

文章编号:1004-7220(2014)04-0339-07

膝关节交叉韧带功能束空间曲线长度的三维动态研究

容可^{1a}, 王海鹏², 王友³, 殷潇凡^{1a}, 杨东^{1b}, 陈炯^{1a}, 夏庆泉^{1a}, 谷辉杰^{1a}

(1. 上海市闵行区中心医院 a. 骨科, b. 放射科, 上海 201199; 2. 上海市静安区中心医院 骨科, 上海 200040;
3. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 骨科, 上海 200011)

摘要: **目的** 分析前、后交叉韧带功能束在膝关节运动过程中的变化规律,为研究交叉韧带损伤机制和移植物重建提供依据。**方法** 选取5具无病理改变的膝关节节段标本作为研究对象,精确解剖膝关节前、后交叉韧带的功能束在股骨与胫骨附着点,然后分别于膝关节在0°、30°、60°、90°、120°进行CT扫描,应用Mimics及ANSYS软件对数据进行三维重建,建立包含交叉韧带附着点的膝关节三维有限元模型,最后应用ANSYS及CATIA软件确立前、后交叉韧带功能束附着部及功能束各平行切面的中心点,连接各中心点的长度,拟合得到以上5个角度各功能束中心点之间的曲线距离,即韧带的真实长度。**结果** 前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)的前内侧束(anterior medial bundle, AMB)在0°~90°的范围内随着屈曲角度增加距离逐渐增大,到120°时距离稍有减小;其后外侧束(posterior lateral bundle, PLB)在0°~90°的范围内随着屈曲角度增加距离逐渐减小,到120°时距离稍有增加。后交叉韧带(posterior cruciate ligament, PCL)的前外侧束(anterior lateral bundle, ALB)和后内侧束(posterior medial bundle, PMB)在0°~120°的范围内随着屈曲角度增加距离逐渐增大。交叉韧带各功能束的长度变化在总体上有统计学差异($P < 0.05$)。**结论** 在膝关节的屈曲过程中,ACL双束之间起到交互作用,而PCL双束之间起到协同作用。通过建立膝关节交叉韧带功能束的有限元模型,更能真实反映交叉韧带的实际长度,为研究交叉韧带各功能束在运动中的真实长度变化提供了合理的方法。

关键词: 膝关节; 交叉韧带; 功能束; 曲线长度

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

3D dynamic research on spatial lengths of functional bundles in knee cruciate ligaments

RONG Ke^{1a}, WANG Hai-peng², WANG You³, YIN Xiao-fan^{1a}, YANG Dong^{1b}, CHEN Jiong^{1a}, XIA Qing-quan^{1a}, GU Hui-jie^{1a}(1. a. Department of Orthopedic Surgery, b. Department of Radiology, Minhang District Central Hospital, Shanghai 201199, China; 2. Department of Orthopedic Surgery, Jingan District Central Hospital, Shanghai 200040, China; 3. Department of Orthopedics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

Abstract: **Objective** To analyze patterns of functional bundles in anterior and posterior cruciate ligaments during knee joint movement, so as to provide important references for studying injury mechanism of cruciate ligaments and implant reconstruction. **Methods** Five healthy knee cadavers were elaborately dissected to expose insertions of functional bundles in anterior and posterior ligaments on both the femur and tibia. CT scans and 3D finite element reconstruction with Mimics and ANSYS were conducted at 0°, 30°, 60°, 90°, and 120° flexion angle of the knee joint. The center points of insertions and parallel sections of functional bundles defined by the software ANSYS and CATIA were connected to the centerlines, and at five different knee flexion angles, the lengths of cen-

收稿日期:2014-04-25; 修回日期:2014-06-18

基金项目:上海市闵行区科学技术委员会自然科学基金课题基金资助项目(2013MHZ007)。

通信作者:王友,教授,博士研究生导师, E-mail: drwangyou@163.com;

殷潇凡,主任医师, E-mail: 18918169029@189.cn。

terlines, defined as the bundle lengths, were measured. **Results** The length of anterior medial bundle (AMB) of anterior cruciate ligament (ACL) increased gradually as the flexion angle grew from 0° to 90° , but slightly decreased at 120° flexion angle; whereas the length of posterior lateral bundle (PLB) of ACL decreased as flexion angle went from 0° to 90° and slightly increased at 120° flexion angle. In posterior cruciate ligament (PCL), both anterior lateral bundle (ALB) and posterior medial bundle (PMB) extended in length as the flexion angle went from 0° to 120° . The change of ACL and PCL bundle's length was statistically significant ($P < 0.05$). **Conclusions** ACL bundles functioned in a reciprocal manner and PCL bundles functioned in a complementary manner during knee flexion. Through establishing the finite element model of functional bundles in cruciate ligaments, the actual length of cruciate ligaments could be reflected, which provided a reasonable method for studying the changes of actual length of functional bundles in cruciate ligaments during knee flexion.

Key words: Knee joint; Cruciate ligament; Functional bundle; Spatial length

膝关节是人体最大的负重关节,韧带数量多,解剖结构复杂,其中前、后交叉韧带是膝关节中重要的韧带,其损伤将会引起膝关节前、后向及旋转不稳。据统计,美国每年约有15万前交叉韧带损伤患者^[1];与前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)相比,后交叉韧带(posterior cruciate ligament, PCL)位置较深,损伤发生率相对较低,主观症状较少。然而,自1990年代以来,有关PCL解剖及生物力学特性的深入研究对其损伤后重建发挥了重要的临床指导作用。交叉韧带功能束的划分一直存在争议,有学者^[2-3]将ACL分为3束,但多数学者^[4-6]根据ACL在胫骨平台的附着点以及在膝关节运动中所起的作用,将ACL分为前内侧束(anterior medial bundle, AMB)和后外侧束(posterior lateral bundle, PLB)两部分,并在文献中获得普遍公认。PCL的分束也存在争议,Kurosawa等^[7]根据纤维在股骨附着的部位将PCL分为前、中、后束,但多数学者^[8-9]认为PCL在解剖和形态上也是由前外侧束(anterior lateral bundle, ALB)和后内侧束(posterior medial bundle, PMB)两个功能束组成。鉴于膝关节交叉韧带在临床医学领域的重要价值,国内外关于交叉韧带在膝关节运动中变化规律的研究已有较多报导,但多数为尸体标本上的直接测量,其精确性、可重复性较差。本试验通过建立膝关节韧带止点的三维有限元模型,将ACL和PCL分为两功能束,确立交叉韧带功能束的中心点,并进一步测量膝关节在不同角度下中心点之间曲线距离的变化,旨在分析膝关节运动过程中ACL和PCL的变化趋势,从而为交叉韧带的损伤机制、移植物的重建等提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

获取5具新鲜尸体的5个膝关节节段标本,年龄26~48岁,影像学检查排除损伤、退变等病理学变化。

1.2 方法

1.2.1 标本准备 去除皮肤、肌肉等膝关节周围软组织,保留膝关节内、外侧副韧带及ACL、PCL。按功能解剖将ACL分为AMB和PLB;PCL解剖为ALB和PMB。分别在股骨与胫骨远端的3个不同方位钻入2mm的螺钉作为标记点。

1.2.2 韧带走向标记及CT扫描 用直径1mm的钢丝沿交叉韧带各束走向间断环形标记,并用3-0手术丝线固定,其钢丝的位置形态即为韧带各束的位置形态。采用16排螺旋CT(GE公司,美国)分别将膝关节标本固定于 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 进行扫描,扫描层厚0.625mm,得到5组断层影像,以DICOM格式输出并刻录在光盘上。

1.2.3 韧带骨止点标记及CT扫描 沿膝关节前、后交叉韧带各功能束的走向,精确解剖其在骨表面的止点,去除韧带,用墨汁标记,其后用2mm钻头沿各束骨止点边缘间断钻孔,标记出各束骨止点的轮廓。随后仍采用16排螺旋CT对带止点标记的标本进行扫描,扫描层厚0.625mm,将得到的断层影像以DICOM格式输出并刻录在光盘上。

1.2.4 膝关节三维模型建立 将上述两步获得的DICOM格式的影像数据导入Mimics 10.0(Materialis公司,比利时)进行三维重建,分别得到屈曲 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 膝关节节段以及含各韧带分束止点的股

骨、胫骨三维模型,并利用在股骨、胫骨上的螺钉标记点进行匹配,最终得到以上5个角度的包括交叉韧带各束及各束骨止点的膝关节节段三维模型。

1.2.5 膝关节有限元模型建立 对三维模型进行

必要的修饰,使模型更加光滑、柔顺,再以 STL 格式导入 ANSYS 软件中进行网格划分,定义接触面,最后得到5个角度下包括交叉韧带各束及各束骨止点的膝关节节段三维有限元模型(见图1)。

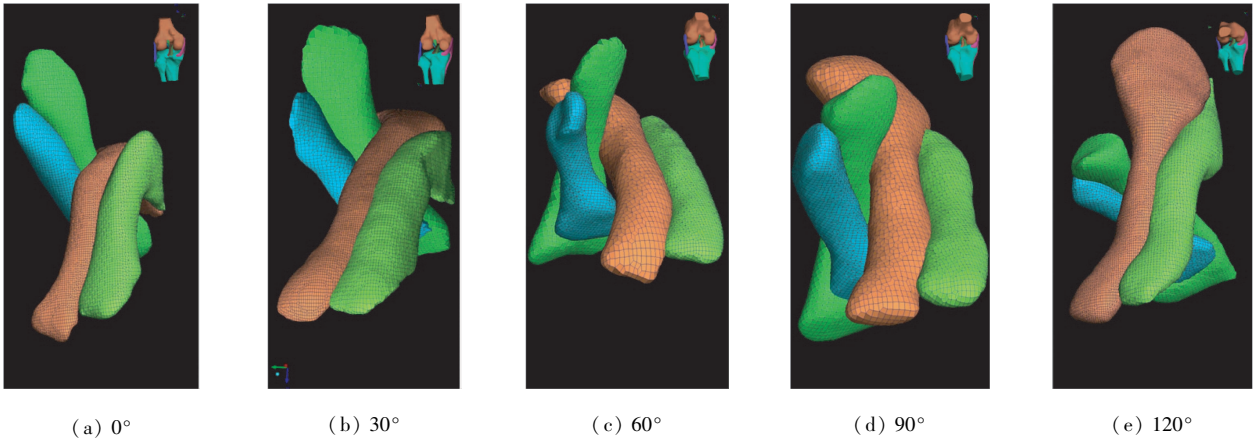


图1 不同角度下交叉韧带各功能束有限元模型

Fig.1 Finite element models of functional bundles in cruciate ligaments at different knee flexion angles

1.2.6 确立交叉韧带各功能束骨止点的中心点

对交叉韧带各功能束在5个角度下进行有限元网格划分,定义与骨的接触面为 Glue 接触,赋予接触面均匀韧带材质属性,在 ANSYS 中通过空间曲面重心计算公式得到接触面重心,即几何中心(见图2)。

所指为相互平行的韧带切面薄片。以原始长度数据为基础,将各束在5个角度下的空间曲线长度减去其对应的最短空间曲线长度,其差值即为相对于最短长度而言被拉伸的距离。

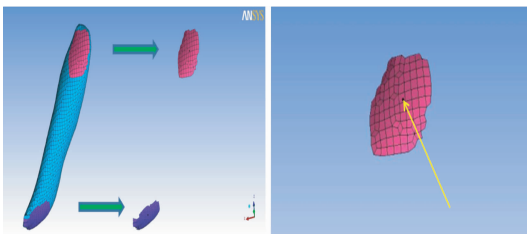


图2 交叉韧带功能束有限元模型骨接触面的提取以及接触面重心的确定

Fig.2 Extraction of bone contact area in 3D finite element model of ligaments and determination of their centers of gravity

1.2.7 交叉韧带各功能束的空间曲线长度

在 CATIA 软件中平行截取功能束若干切面,然后通过交叉韧带各功能束平行切面中心点的计算,将接触面中心与各切面中心拟合,最后得到交叉韧带各功能束在5个角度下的空间曲线长度(见图3)。图3中黑色箭头所指为 Glue 接触面的中心,红色箭头

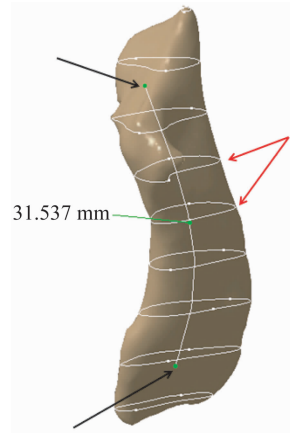


图3 交叉韧带功能束的空间长度

Fig.3 Spatial length of functional bundles in cruciate ligaments

1.2.8 统计学方法

采用 SPSS 13.0 统计软件,通过方差分析检测膝关节屈曲过程中各功能束被拉升差值是否具有统计学差异,SNK 方法检测组间差异, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果

在膝关节屈曲过程中,ACL的AMB与PLB之间存在交互作用,而PCL的ALB与PMB之间存在协同作用,交叉韧带各功能束的长度变化在整体上有统计学差异($P < 0.05$)。

2.1 ACL 双束空间曲线长度差值的变化

在膝关节屈曲过程中,AMB在膝关节屈曲 0° 时最短,在 90° 时拉伸达到最大差值((3.01 ± 0.19) mm),在 120° 时稍有所下降((2.58 ± 0.37) mm)。AMB在膝关节屈曲 30° 、 60° 、 90° 时分别被拉伸(0.83 ± 0.13)、(2.3 ± 0.35)、(3.01 ± 0.19) mm,被拉伸的差值变化有统计学差异($P < 0.05$)。PLB在膝关节 0° 时拉伸达到最大差值((3.29 ± 0.31) mm),在 90° 时最短,在 120° 时稍有所上升((0.58 ± 0.10) mm)。PLB在膝关节屈曲 0° 、 30° 、 60° 时分别被拉伸(3.29 ± 0.31)、(2.62 ± 0.27)、(1.65 ± 0.21) mm,被拉伸的差值变化有统计学差异($P < 0.05$,见图4)。

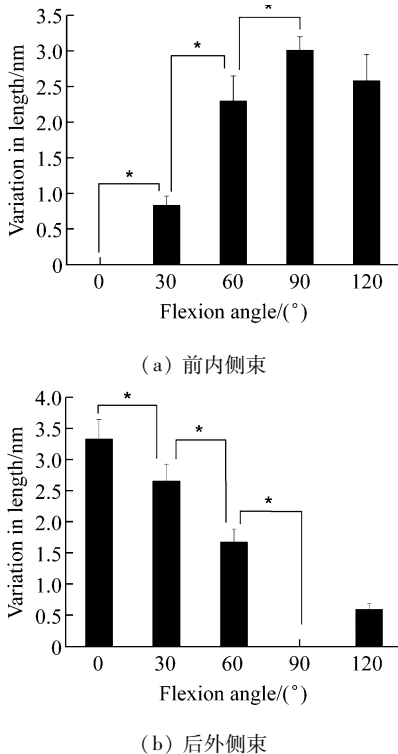


图4 ACL各束原始长度与对应最短长度的差值在不同角度下的变化趋势(* $P < 0.05$)

Fig. 4 The tendency of spatial lengths of ACL bundles at different knee flexion angles (a) AMB, (b) PLB

2.2 PCL 双束空间曲线长度差值的变化

在膝关节屈曲过程中,ALB在膝关节屈曲 0° 时最短,在 120° 时拉伸达到最大差值((8.71 ± 0.49) mm),ALB在膝关节屈曲 30° 、 60° 、 90° 时分别被拉伸(1.34 ± 0.30)、(2.77 ± 0.28)、(8.29 ± 0.63) mm,被拉伸的差值变化有统计学差异($P < 0.05$)。PMB也在膝关节屈曲 0° 时最短,在 120° 时拉伸达到最大差值((7.48 ± 0.41) mm),PMB在膝关节屈曲 60° 、 120° 时分别被拉伸(6.22 ± 0.47)、(7.48 ± 0.41) mm,被拉伸的差值变化有统计学差异($P < 0.05$,见图5)。

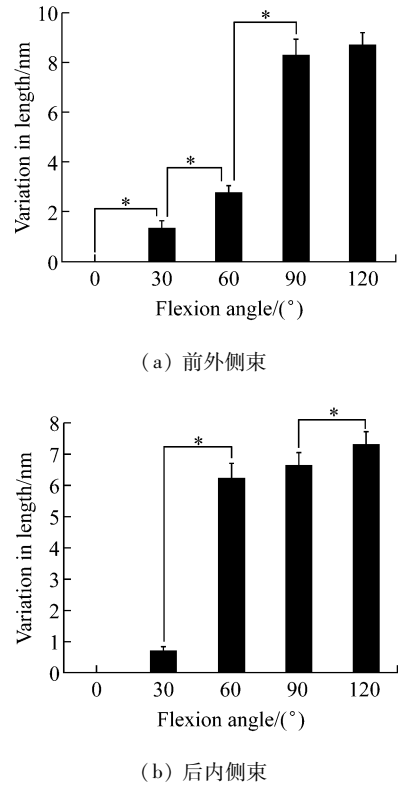


图5 PCL各束原始长度与对应最短长度的差值在5个角度下的变化趋势(* $P < 0.05$)

Fig. 5 The tendency of spatial lengths of PCL bundles by knee flexion angles (a) ALB, (b) PMB

3 讨论

3.1 交叉韧带功能束空间曲线长度的计算方法

交叉韧带各功能束在膝关节屈伸运动过程中空间长度不断变化,既往研究韧带长度时多是通过标本直接测量,且多为直线距离,误差较大,可重复性

不高^[2,10-11]。本研究在前期建立膝关节三维有限元模型的基础上^[12],通过对交叉韧带各功能束进行有限元网格划分,定义接触面,赋予接触面均匀韧带材质属性,通过 ANSYS 中自带的计算均匀材质的连续空间曲面重心公式精确得到其重心,即接触面的几何中心,这与既往研究中^[10,13]通过对交叉韧带附着点近似为简单几何图形,或通过对角线的交点确定中心点的方法相比,更加合理和精确。然后,在 CATIA 中平行截取功能束若干切面,通过平面薄片重心计算公式得到各平行切面薄片的重心,即几何中心,将接触面中心导入 CATIA 中与各薄片中心进行拟合,得到各功能束多平面中心点的空间曲线距离,此距离与既往直接测量直线距离相比,更能真实反映交叉韧带的实际长度,为研究交叉韧带功能束在各个屈曲角度下的真实长度变化规律提供更加合理的方法。

3.2 ACL 各功能束的空间曲线长度的变化规律

近年来,越来越多的学者认为 ACL 双束重建比单束重建更接近正常膝 ACL 的解剖及生物力学功能,故正确把握 ACL 双束的生物力学特性对在膝关节镜手术中双束重建方法的选择就显得尤为重要。遗憾的是,由于研究对象以及研究方法的不同,目前研究结果仍存在很多争议。文献^[13-14]的研究结果显示,在膝关节 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的被动屈曲过程中,AMB 长度增加,PLB 长度减小。而 Jordan 等^[15]通过人活体负荷实验发现,ACL 双束在低屈曲角度下长度最大,而随着膝关节屈曲,双束均缩短,两者起协同作用。以上无论在尸体标本或是活体上的研究,其 ACL 双束长度的测量都是以股骨与胫骨附着部中心点的直线距离为代表,未能真实反映各功能束的真实长度变化,可重复性不佳,故结果各异。本研究通过建立交叉韧带的三维有限元模型,所得的 ACL 双束长度为空间曲线距离,比较真实反映了其韧带长度的变化。本研究结果显示,AMB 在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 内随着屈曲角度的增加被逐渐拉伸, 90° 时达最大值,到 120° 时稍减小,在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 屈曲过程中被拉伸的差值具有统计学差异($P < 0.05$);PLB 在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 内随着屈曲角度的增加长度逐渐减小,在 90° 时达到最小值,到 120° 时稍有增加,在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 屈曲过程中被拉伸的差值具有统计学差异($P < 0.05$,见图 4)。AMB 随着膝关节屈曲角度的增加逐渐紧张,到 90°

时达到最大值;PMB 随着膝关节屈曲角度的增加逐渐松弛,到 90° 时达到最低值;提示随着膝关节屈曲角度的增大,AMB 对限制胫骨前移逐渐发挥主导作用,在 90° 时达到最大;与此相对应,PLB 在膝关节低屈曲角度下对限制胫骨前移起主导作用,这与多数文献报导“在膝关节伸直时 PLB 紧张,张应力最大,而在膝关节屈曲时 AMB 紧张,张应力最大”的结论一致^[2,6,11]。

在膝关节镜下 ACL 双束重建手术中,以 PLB 在低屈曲角度下最长为研究基础,多数学者建议在低屈曲角度下($0^{\circ} \sim 15^{\circ}$)收紧固定 PLB,在临床中得到广泛认可^[15-17],本实验与上述结果一致。但由于对 AMB 在膝关节运动过程中的长度及拉应力变化趋势仍然存在争议,故在膝关节镜下到底在何角度收紧固定 AMB 仍有异议。一些学者^[16-17]建议在 45° 或 60° 固定 AMB,而 Jordan 等^[15]建议在膝关节伸直位固定 AMB,均获得较满意效果。本研究结果显示,AMB 在 90° 时拉伸达最大值,故对在低屈曲角度下收紧固定 AMB 的方法存在疑虑,建议在稍高屈曲角度下固定 AMB。另外,膝关节在 $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 的屈曲过程中,AMB 和 PLB 被拉伸的最大值分别为 (3.01 ± 0.19) 和 (3.29 ± 0.31) mm,表明以骨止点中心点代表的 AMB 的等长性较好;提示进行 ACL 移植物的单束重建时,以 AMB 骨止点的中心点作为隧道定位点,具有较高的参考价值。多数学者^[2,18-19]报导,股骨隧道的位置是影响等长性的决定因素,如果进行单束重建,则将股骨隧道位置定位到接近 AMB 附着点的部位,其等长性较好,这与本研究结果相近。

3.3 PCL 各功能束的空间曲线长度的变化规律

膝关节 PCL 的位置较深,且常常合并其他组织结构损伤,给 PCL 损伤的诊断及治疗带来了一定的困难。相比较 ACL 而言,对 PCL 生物力学特性的研究发展较晚;但近年来,随着广大临床医生及学者对 PCL 损伤的进一步重视,对其生物力学特性的研究也不断完善,但仍存在很多争议。既往的一些研究^[10,20]报道,ALB 在屈曲时紧张,伸直时松弛,而 PMB 在伸直时紧张,屈曲时松弛,两者在膝关节的运动中起交互式功能。而近年来在对活体膝关节在承重状态下的研究方面, Li 等^[21]报道膝关节在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的屈曲过程中,PCL 两束长度呈递增趋势,在 90° 达最大值。本研究结果显示,ALB 和 PMB 在 0°

~120°内随着屈曲角度的增加均表现为被逐渐拉伸,在120°时达到最大值,整体上具有统计学差异($P < 0.05$,见图5),这与Papannagari等^[22]报道“膝关节在0°~120°屈曲过程中,PCL两束长度呈递增趋势,在120°达最大值”的结果一致。Yue等^[23]通过研究保留PCL活体膝关节置换术前后韧带长度变化,也得到了相似的结果。本研究结果表明,ALB和PMB在0°~120°范围内随着屈曲角度的增加均表现为逐渐紧张,提示在膝关节屈曲过程中共同限制胫骨的后移,两者起协同作用。

目前多数学者^[24-25]建议在PCL移植重建时,在屈膝90°时收紧固定PMB,在0°时收紧固定ALB;本研究发现ALB和PMB在膝关节的屈曲过程中逐渐被拉伸,起协同作用,故是否在更高角度收紧固定此双束值得进一步探讨。另外,本研究结果显示,ALB和PMB被拉伸的最大值分别为(8.71 ± 0.49)和(7.48 ± 0.41)mm,表明以骨止点的中心点为代表的PCL双束等长性均较差。学者们在PCL等长点研究中采用的实验条件与定位方法各异,导致结果差异较大。例如,Markolf等^[26]将PCL股骨附着部视作一个椭圆,用钢丝将其前、上、中、下各点与胫骨附着部中点相连,在0°~120°活动范围测量关节内钢丝长度的变化,发现上测试点最等长,中、远两点也可为临床接受,前测试点最不等长,故认为PCL重建时应以其股骨附着部上缘的中点为中心建立骨隧道,尽量避免在前缘定位。而Covey等^[27]将PCL分为前、中、后纵、后斜4束,发现后纵、后斜两束最等长,但这两束只占整个PCL纤维的5%~15%,将替代物重建在这两束的位置上,势必使大多数PCL纤维得不到重建,因而不能恢复PCL原有的生理功能,故作者对PCL是否能进行等长重建提出质疑。目前,PCL等长点的问题悬而未决,今后需要对其作进一步的探讨。

4 结论

本研究通过建立膝关节交叉韧带功能束的有限元模型,能够更真实反映交叉韧带的实际长度,为研究交叉韧带各功能束在运动中的真实长度变化提供合理的方法。另外,本研究结果显示,在膝关节屈曲运动过程中,ACL的双束之间起到交互作用,而PCL双束之间主要起到协同作用。本研究也存在一些不

足:首先,标本数量相对较少,在以后的研究中将逐渐加大标本的数量;其次,虽然对不同屈膝角度情况下膝关节交叉韧带功能束的空间长度变化规律进行研究,但是由于试验条件的限制,只选取了5个屈膝角度,选取更多的角度对于临床研究可能更加具有指导意义;最后,在研究交叉韧带的变化规律时,只对长度这一单一因素进行探讨,不能完全代表韧带的应力作用效果,后者不仅与韧带长度变化有关,还与韧带空间方位、矢量角度等因素相关,今后将通过对有限元模型的进一步完善,结合更多作用因素,使所得到的韧带变化规律更具临床价值。

参考文献:

- [1] Woo SL, Wu C, Dede O, *et al.* Biomechanics and anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Orthop Surg Res*, 2006, 1: 2.
- [2] Amis AA, Dawkins GP. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1991, 73(2): 260-267.
- [3] Fujie H, Otsubo H, Fukano S, *et al.* Mechanical functions of the three bundles consisting of the human anterior cruciate ligament [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2011, 19(Suppl 1): S47-53.
- [4] Zantop T, Petersen W, Sekiya JK, *et al.* Anterior cruciate ligament anatomy and function relating to anatomical reconstruction [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14(10): 982-992.
- [5] Ng AW, Lee RK, Ho EP, *et al.* Anterior cruciate ligament bundle measurement by MRI [J]. *Skeletal Radiol*, 2013, 42(11): 1549-1554.
- [6] Markatos K, Kaseta MK, Lalloos SN, *et al.* The anatomy of the ACL and its importance in ACL reconstruction [J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2013, 23(7): 747-752.
- [7] Kurosawa H, Yamakoshi K, Yasuda K, *et al.* Simultaneous measurement of changes in length of the cruciate ligaments during knee motion [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1991, 265: 233-240.
- [8] Amis AA, Gupte CM, Bull AM, *et al.* Anatomy of the posterior cruciate ligament and the meniscofemoral ligaments [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14(3): 257-263.
- [9] Takahashi M, Matsubara T, Doi M, *et al.* Anatomical study of the femoral and tibial insertions of the anterolateral and posteromedial bundles of human posterior cruciate ligament

- [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2006, 14(11): 1055-1059.
- [10] Girgis FG, Marshall JL, Monajem A. The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1975, 106: 216-231.
- [11] Steckel H, Starman JS, Baums MH, *et al.* Anatomy of the anterior cruciate ligament double bundle structure: A macroscopic evaluation [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2007, 17(4): 387-392.
- [12] 王海鹏, 王友, 容可, 等. 三维有限元法分析膝关节内侧副韧带的生物力学功能 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 40-45.
- Wang HP, Wang Y, Rong K, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on biomechanical functions of medial collateral ligament in knee joint [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 40-45.
- [13] Takai S, Woo SL, Livesay GA, *et al.* Determination of the in situ loads on the human anterior cruciate ligament [J]. *J Orthop Res*, 1993, 11(5): 686-695.
- [14] Hollis JM, Takai S, Adams DJ, *et al.* The effects of knee motion and external loading on the length of the anterior cruciate ligament (ACL): A kinematic study [J]. *J Biomech Eng*, 1991, 113(2): 208-214.
- [15] 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 [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(4): 547-554.
- [16] Goldsmith MT, Jansson KS, Smith SD, *et al.* Biomechanical comparison of anatomic single- and double-bundle anterior cruciate ligament reconstructions: An *in vitro* study [J]. *Am J Sports Med*, 2013, 41(7): 1595-1604.
- [17] Ettinger M, Petri M, Guenther D, *et al.* Anatomic double-bundle ACL reconstruction restricts knee extension in knees with hyperextension [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(9): 2057-2062.
- [18] Bradley J, FitzPatrick D, Daniel D, *et al.* Orientation of the cruciate ligament in the sagittal plane. A method of predicting its length-change with flexion [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1988, 70(1): 94-99.
- [19] Hefzy MS, Grood ES, Noyes FR. Factors affecting the region of most isometric femoral attachments. Part II: The anterior cruciate ligament [J]. *Am J Sports Med*, 1989, 17(2): 208-216.
- [20] Ahmad CS, Cohen ZA, Levine WN, *et al.* Codominance of the individual posterior cruciate ligament bundles. An analysis of bundle lengths and orientation [J]. *Am J Sports Med*, 2003, 31(2): 221-225.
- [21] Li G, DeFrate LE, Sun H, *et al.* *In vivo* elongation of the anterior cruciate ligament and posterior cruciate ligament during knee flexion [J]. *Am J Sports Med*, 2004, 32(6): 1415-1420.
- [22] Papannagari R, DeFrate LE, Nha KW, *et al.* Function of posterior cruciate ligament bundles during *in vivo* knee flexion [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(9): 1507-1512.
- [23] Yue B, Varadarajan KM, Rubash HE, *et al.* *In vivo* function of posterior cruciate ligament before and after posterior cruciate ligament-retaining total knee arthroplasty [J]. *Int Orthop*, 2012, 36(7): 1387-1392.
- [24] Cury Rde P, Mestriner MB, Kaleka CC, *et al.* Double-bundle PCL reconstruction using autogenous quadriceps tendon and semitendinous graft: Surgical technique with 2-year follow-up clinical results [J]. *Knee*, 2014, 21(3): 763-768.
- [25] Wijdicks CA, Kennedy NI, Goldsmith MT, *et al.* Kinematic analysis of the posterior cruciate ligament, part 2: A comparison of anatomic single- versus double-bundle reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2013, 41(12): 2839-2848.
- [26] Markolf KL, Slauterbeck JR, Armstrong KL, *et al.* A biomechanical study of replacement of the posterior cruciate ligament with a graft. Part II: Forces in the graft compared with forces in the intact ligament [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1997, 79(3): 381-386.
- [27] Covey DC, Sapega AA, Sherman GM, *et al.* Testing for isometry during reconstruction of the posterior cruciate ligament. Anatomic and biomechanical considerations [J]. *Am J Sports Med*, 1996, 24(6): 740-745.