

## 一种无图像导航下 ACL 重建的等距规划方法<sup>①</sup>

胡 岩<sup>②</sup> 王田苗 胡 磊 王君臣

(北京航空航天大学机器人所 北京 100191)

**摘 要** 针对膝关节前交叉韧带(ACL)移植位置不易确定的问题,采用光电跟踪技术,提出了一种基于等长规划的 ACL 无图像导航重建方法。首先根据韧带等距理论,设计了一种基于计算胫骨绕股骨运动过程中距离变化最小的点对的等距规划方法,然后分析了无图像导航系统的总体结构及关键技术,包括手术空间各对象的坐标转换、关节特征采集原则和表面重建方法,最后利用该方法进行了 2 例牛腿骨实验。结果表明,该规划方法合理有效,在股骨/胫骨的生长区域内的定位精度达 1.45mm,能够满足临床手术要求。

**关键词** 计算机辅助矫形外科(CAOS),前交叉韧带(ACL)重建,等距,光电相机跟踪,无图像导航

## 0 引 言

膝关节前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)的损伤是一种常见的运动损伤形式。ACL 损伤后,其功能失效率高达 8% ~ 25%<sup>[1-3]</sup>, ACL 功能失效后,需要重建 ACL。ACL 重建时,移植物由于不等距,因而很容易被拉伸,并且难以控制膝关节运动时的稳定性<sup>[4]</sup>。在传统的关节镜外科领域,移植物入点位置的确定是非常困难的,因此,ACL 重建手术的最关键问题是如何确定移植物的最优植入点<sup>[5]</sup>。

计算机辅助矫形外科(computer assisted orthopaedic surgery, CAOS)技术能够提高手术定位精度,该技术为解决确定移植物最优植入点的问题提供了良好的方法<sup>[6]</sup>,例如,利用此技术,美国卡耐基·梅隆大学<sup>[7]</sup>研制了 Knee Navigation 系统,德国 Brain-Lab<sup>[8]</sup>开发了 Vector Vision 图像引导手术(image guided surgery, IGS)系统。十几年前出现的无图像导航(image-free navigation)技术,最早应用到了关节置换手术中<sup>[9]</sup>。另外,法国格勒诺布尔大学 TIMC 研究所的 Lavallée 最早利用术中重建的骨骼表面进行手术规划<sup>[10]</sup>,此后,Flaute 等人提出了三维骨骼变形技术<sup>[5]</sup>。2002 年,Stindel 首次应用三维骨骼变形进行了全膝关节置换<sup>[11,12]</sup>。目前,国际上已经形成的较成熟的无图像导航系统有德国 Tuttligen 公司的 OrthoPilot<sup>[13-16]</sup>和法国 Praxim 公司的 Surgetics<sup>[6,17,18]</sup>,它

们的定位精度能够达到 1mm<sup>[19]</sup>,不等距值小于 3mm<sup>[17,20]</sup>。OrthoPilot 积累了专家的临床经验和观念,对股/胫骨隧道进行导航,Surgetics 采用解剖标志点、运动学、关节表面数据,对股/胫骨隧道进行导航,但这些系统的价格过于昂贵。目前,国内对计算机辅助的 ACL 规划方法的研究尚处于空白。

本文提出了一种基于等长规划的 ACL 无图像导航重建方法,该方法是在基于红外线的光电相机 Polaris 的实时监控下,利用探针分别采集股/胫骨的表面点云,将散乱点云数据重构成连续的曲面,作为关节运动的功能表面,通过自行编制的算法计算胫骨绕股骨转动过程中两骨面的点之间距离变化最小的点对,并记此为移植物的植入点,其应符合最佳的等距性和避免撞击股骨髁间窝顶<sup>[5]</sup>。借助无图像导航技术,外科手术可以不再使用术前 CT 等影像,从而减少手术费用,而且操作过程中不用 C 臂 X 线机,避免医患双方受 X 线辐射的困扰。与传统手术比较,此方法可提高定位精度,增强医生的视觉效果,并且操作界面简单。

## 1 ACL 等距理论

在膝关节活动过程中,ACL 的不同纤维束保持了恒定的张力。从这个生理特点出发,提出了 ACL 的等距特性,即膝关节伸屈范围内胫骨、股骨止点之间距离保持等长。ACL 重建后移植物上的张力变化

① 国家杰出青年科学基金(60525314),国家科技支撑计划(2006BAI03A16)和北京市科技计划(H060720050230)资助项目。

② 男,1979 年生,博士生;研究方向:医疗机器人技术,虚拟现实技术;联系人,E-mail: buaarobot@126.com  
(收稿日期:2008-10-09)

除受预应力的影响外,关键受到股骨和胫骨隧道内口之间距离变化的影响,该距离变化过大,可能会导致重建韧带过度松弛,或者重建韧带承受过度应力而断裂。ACL 重建的主要目的是恢复膝关节的稳定性,使隧道内口距离在整个伸屈范围内无过度变化,而避免移植物功能不全或者断裂。

ACL 重建要取得成功,必须遵从等距特性。如果重建满足等距性,则在膝关节屈伸过程中,移植物在胫骨和股骨入点之间的距离变化最小。基于医学上对生理等距的定义<sup>[21]</sup>可以推断,正常人体/动物的 ACL 在运动过程中变化最小,换句话说,规划的股骨/胫骨所有特征点的距离最小的一对点即为等距点对。

## 2 等距规划方法

膝关节的等距性即胫骨在绕股骨转动过程中,前交叉韧带的长度变化非常小,基本保持等距。为此,我们提出了针对等距性而进行的一种规划方法,即在胫骨转动过程中,规划股骨和胫骨上的植入点间距离为所有点对距离中变化最小的。具体的算法思想是:将采集到的散乱点分为两组,即股骨点集和胫骨点集,分别记为  $\{F_i\}$  和  $\{T_j\}$ , 设  $m$  为股骨点数,则  $i = 1, 2, \dots, m$ , 设  $n$  为胫骨点数,则  $j = 1, 2, \dots, n$ 。均匀转动胫骨,并且每转过一定角度踩下脚踏板,记此角度为  $\theta_k, k = 1, 2, \dots, p$ 。每踩下脚踏板,即保存一个胫骨到股骨坐标的转换矩阵,记为  $M_{\theta_k}$ 。根据这些转换矩阵,可以计算点集中任意点对间的距离,记为  $d_k$ 。设胫骨点坐标在股骨坐标系下的矩阵为  $T'_j$ , 则

$$T'_j = T_j \cdot M_{\theta_k} \quad (1)$$

任意的股骨和胫骨上的点对之间的距离为

$$d_k = \|F_i - T'_j\| = \|F_i - T_j \cdot M_{\theta_k}\| \quad (2)$$

其距离变化为  $\Delta d_k = \max_{1 \leq k \leq p} d_k - \min_{1 \leq k \leq p} d_k$ , 然后,可以计算  $\{F_i\}$  和  $\{T_j\}$  中任意两点间在胫骨转动过程中,距离变化量最小的一对:

$$ANI(F, T) = \min_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} \Delta d_k \quad (3)$$

记此股骨和胫骨上的点即为规划的植入点,并将包围该点的三角面片记为植入区域。将计算得到的股骨和胫骨点序记录到文本文件,并在图像上将此两点和其所在区域分别用不同的颜色显示。

## 3 系统总体结构

无图像导航下的 ACL 重建规划系统主要由光

电跟踪模块、骨面特征术中重建模块和等距规划模块组成,系统结构如图 1 所示。

### 3.1 光电跟踪模块

光电跟踪模块主要包括 Polaris、能够被跟踪的反光标记、安装有标记的手术器械以及自行研制的光电跟踪平台。光电跟踪设备采用的是加拿大渥太华 NDI 公司的 Polaris 系统,该系统是基于红外线的光电跟踪定位器。相比视频相机 MicronTracker, Polaris 定位精度更高,探测范围更广,预热时间更短,稳定性更好,不易受到外界环境的影响。且 Polaris 具有激光定位功能,利于医生对探测对象是否在其探测范围内进行调整。所以,该无图像规划系统中采用了本套光电跟踪相机。

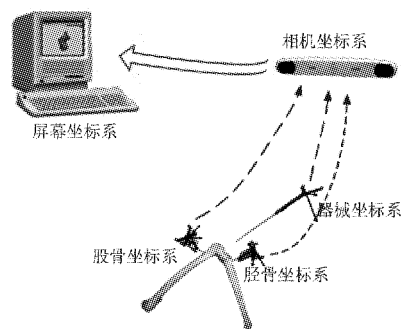


图 1 系统结构图

将它安装到可移动的支架上,跟踪安装有反光标记的手术对象的位置。手术对象包括患肢(股骨和胫骨)以及相关手术器械。利用 Polaris 光电跟踪相机,能够对每一帧图像识别手术器械和手术对象上标记,计算出其在相机坐标系下的坐标转换矩阵。在关节、手术器械上分别安装标记,用以代表其坐标系。实际手术中需要建立相对的空间关系,即使患肢或者手术器械都在移动的情况下,依然可以正确地显示两者的相对位置关系。

### 3.2 骨面特征术中重建模块

骨面特征术中重建模块主要由点云采集功能、表面重建算法 Delaunay 以及相关辅助功能组成。骨面形状术中重建模块是无图像导航下 ACL 重建规划植入点能否满足两个标准的关键,它的算法是否合理、精度和实时性是否满足要求,都关系到规划方法的成败。在双目光电跟踪相机 Polaris 的实时监控下,医生利用装有标记的手术器械,在人体膝关节的股骨髁间窝、胫骨平台等植入区域划点,以一定的采样频率采集三维散乱样点并利用 Delaunay<sup>[22]</sup>三角网格算法进行骨骼表面的重建,将采样到的点重建成

股/胫骨的曲面,作为三维规划方法的功能表面。

Delaunay 三角剖分算法简单、实用,具有很强的通用性,用 Delaunay 算法生成初始网格和内部网格,保证了几何边界的完整性和内部网格的质量以及重建速度。生成的网格质量比较好,不仅适用于各种复杂的计算区域,而且能非常方便地实现局部加密。前交叉韧带重建手术是在形状非常复杂的股骨和胫骨上进行的, Delaunay 算法正好能够满足重建面的真实性和局部区域的复杂性。并且手术对于时间的要求都比较高, Delaunay 算法的实时性也能够满足此指标。

### 3.3 等距规划模块

等距规划模块主要由股骨/胫骨任意两点间的距离变化算法、规划的植入点及其周围面积的高亮显示和辅助矩阵采集的脚踏板组成。

## 4 实验及结果分析

本实验中,手术器械由 Polaris 自带的探针代替。

### 4.1 骨面形状重建实验

将两条新鲜的牛后腿(如图 2 所示)解剖,浸泡于医用酒精制作成标本。分别在股骨和胫骨上容易被 Polaris 跟踪的位置钻孔,安装标记,如图 3 所示。试验平台如图 4 所示。



图 2 两条牛后腿标本

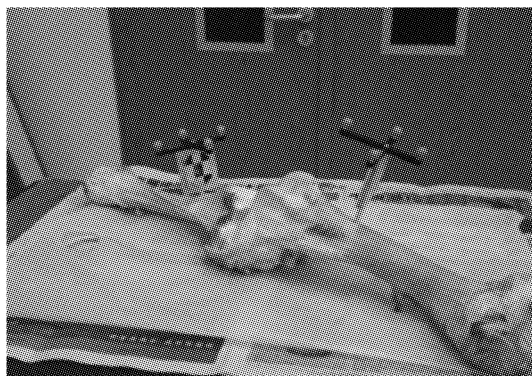


图 3 安装 LED 的牛腿



图 4 试验平台

为了验证骨表面重建算法的实时性,利用探针在骨骼表面分别采集八组散乱点,并进行散乱点的三维重建,分别记录重建所需要的时间,并与医生要求的重建时间(医生要求一般在 10s 以内)进行比较,实验结果如表 1 所示。可以看出,用散乱样点的采集时间、重建时间和重建后的质量等参数指标来评定,股骨 906 个点和胫骨 717 个点是最好的,其它点重建后都会出现表面不光滑和失真等现象,实验结果表明这些现象与点的数量、医生在采点时所用力量是否保证针尖始终贴在骨骼表面以及相机的监测误差有关。从实验结果来看,该系统的散乱样

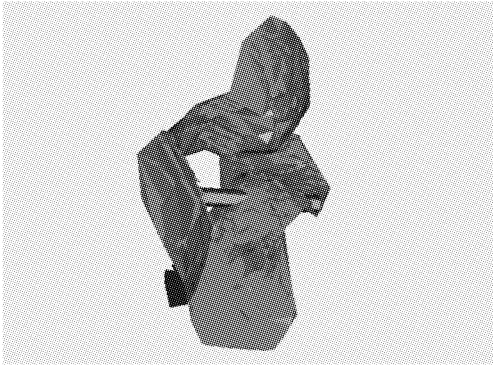
表 1 关节表面重建参数表

时间(s)

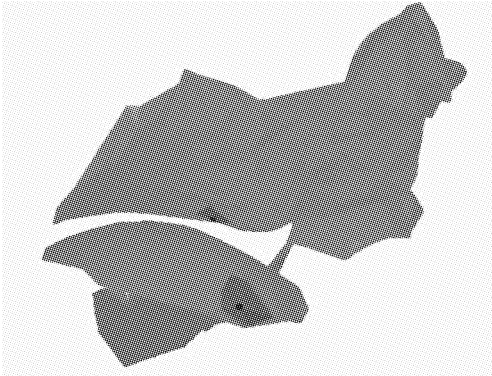
| 序号 | 散乱点数  | 骨骼 | 散乱点采集时间 | 重建时间 | 重建面的质量             |
|----|-------|----|---------|------|--------------------|
| 1  | 307   | 胫骨 | 65      | 2.2  | 表面不光滑,失真严重         |
| 2  | 334   | 股骨 | 76      | 2.7  | 表面不光滑,形状较真         |
| 3  | 411   | 胫骨 | 89      | 3.1  | 表面不光滑,失真严重         |
| 4  | 597   | 股骨 | 108     | 4.5  | 局部表面不光滑,有失真,散乱点有交叠 |
| 5  | 705   | 胫骨 | 122     | 5.4  | 表面不光滑,失真严重,散乱点有交叠  |
| 6  | 717   | 胫骨 | 126     | 5.8  | 表面光滑,形状非常真         |
| 7  | 906   | 股骨 | 153     | 6.9  | 表面光滑,形状非常真         |
| 8  | 1 205 | 股骨 | 212     | 8.2  | 表面不光滑,失真严重,散乱点有交叠  |

点采集时间、重建时间以及重建面的质量完全能够

满足医生的要求。重建的关节表面如图 5 所示。



(a) MicronTracker 采集点重建



(b) Polaris 采集点重建

图 5 规划结果图

4.2 ACL 等距规划实验

固定股骨转动胫骨,每转过一定角度,踩脚踏板记录一个转换关系。计算等距的规划点,图像上即显示。利用实际的手术器械尖端在股骨和胫骨上分别查找植入点,当虚拟的探针尖端点到虚拟规划的植入点时,此时实际手术器械在牛骨标本上指向的点即为实际中要打孔的植入点位置,如图 5 所示。记录规划点,股骨为第 1250 个点,胫骨为第 573 个点。经过实验,当虚拟环境中的探针指到规划的植入点上时,实际的探针也指在了牛骨标本股骨生长区域内。同样的方法测试,胫骨虚拟规划点同样也能够指在生长区域内。由图 5 可以比较得到,Polaris 采样的点重建面比 MicronTracker 的更加光顺,因而导航精度更高。

如图 6 所示,为医生确定规划点是否在 ACL 的生长区域内的图。证明该方法能够辅助医生进行 ACL 的重建规划。在 Polaris 跟踪下,利用探针探查规划点 100 次,并分别在股/胫骨上用彩笔记录点,如图 7 所示,利用游标卡尺测量距离最远两规划点的距离,最大为 1.45mm,医生对误差的要求为 2mm。

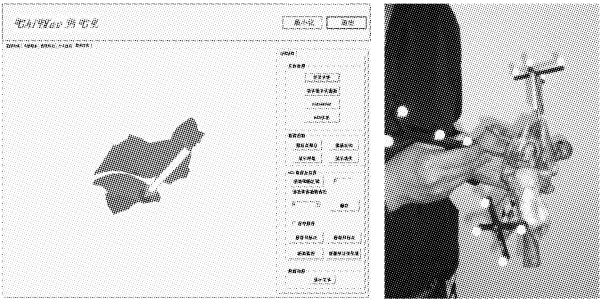


图 6 确定植入点是否在生长点

利用不等距仿真评估模块进行运动仿真,等距值的最大为 2.36mm。对该方法的规划进行了 10 次实验,记录时间如表 2 所示。

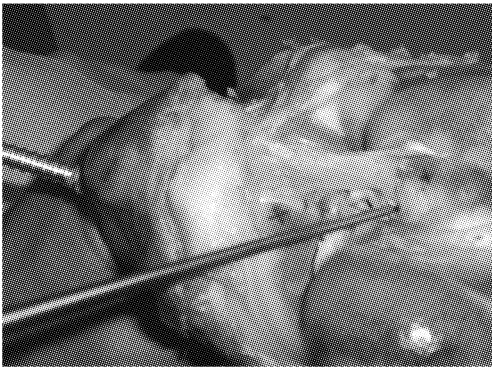


图 7 在骨面标记的规划点

| 表 2 等距规划方法的耗时 |      |     |     |     |     |     |     |     | 时间(min) |
|---------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
|               | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9       |
| 耗时            | 10.0 | 9.7 | 9.4 | 8.8 | 9.6 | 8.1 | 8.4 | 9.3 | 10.0    |

OrthoPilot 系统耗时 10~15min<sup>[23]</sup>,Surgetics 系统一般耗时 17min 左右<sup>[8]</sup>。从表中可得到,用该方法进行导航手术规划的耗时在 10min 以内,可见该方法规划时间更短。OrthoPilot 和 Surgetics 系统的定位精度都可以达到 1mm 以内,与其相比,该方法的定位精度还有差距,但是不等距值和定位精度都可以满足医生的要求,并且其人机交互界面更加直观、简洁,便于医生进行手术操作,因而手术规划的耗时更少,可以进一步应用于临床。

经过分析,造成系统误差的原因主要如下:

(1) 光电跟踪相机的标定误差。NDI Polaris 相

机的标定误差为 0.25mm。

(2) 空间映射的转换误差。由于手术环境中各手术对象之间是通过相机实现坐标的转换,从而在计算机图像中显示的,每次转换都会有一定的转换误差,误差累加,导致系统的误差增大。

(3) 手术器械尖端的标定误差。由于相机监测到的是手术器械的坐标中心,此坐标中心在手术器械的型心上,而其尖端到型心的测量也具有一定的误差。

(4) 基于散乱点的重建误差。由于手术器械的尖端是球面、散乱点重建算法的误差以及(3)中的原因,造成了重建的骨面与实际关节面之间的误差。

(5) 医生在进行手术操作时的人为误差。由于医生在划点、探找植入点时,会有抖动,造成一定的误差。

## 5 结 论

本文针对单束重建提出了基于生理等距无图像导航下的 ACL 重建规划方法,介绍了导航系统的关键技术实现方法,并分别进行了在 Polaris 光电相机跟踪下骨表面重建和不等距性规划的 2 例牛骨实验。通过实验可以得到平衡采集时间、重建时间和重建质量等标准的最好的采样点数:股骨 906 点和胫骨 717 点。同时,从实验效果看,用本系统的规划方法对 ACL 的入点进行规划,规划的入点皆落在原 ACL 生理区域内,初步验证了利用该方法可以进行 ACL 的重建入点规划的可行性。并进行了重复定位精度的实验。利用本系统可以使等距规划可视化,更加直观,极大地提高手术的成功率,并且使医患双方免受辐射。无图像导航技术是未来 CAS 技术发展的一个重要方向,国际上只有少数几家单位进行了研究,国内还没有展开研究。

针对本系统,进行了重复定位精度的实验,最大值为 1.45 mm,用虚拟仿真评估进行验证,最大的等距值在 3 mm 以内。但是,与世界先进水平相比还有差距,应进一步提高入点规划精度,提高映射精度、重建精度和手术器械尖端的标定精度,争取早日进行尸体实验和临床手术。

## 参考文献

[ 1 ] Paessler H H, Hoeher J. Intraoperative quality control of the placement of bone tunnels for reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Unfallchirurg*, 2004, 107: 263-272

[ 2 ] Holmes J G, James S L, Larson R L, et al. Retrospective direct comparison of three intraarticular anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*, 1991, 19: 596-600

[ 3 ] Howe J G, Johnson R J, Kaplan M J, et al. Anterior cruciate ligament reconstruction using quadriceps patellar tendon graft, part I: Long term follow up. *Am J Sports Med*, 1991, 19: 447-457

[ 4 ] Hüfner T, Meller R, Kendoff D, et al. The role of navigation in knee surgery and evaluation of three-dimensional knee kinematics. *Operative Techniques in Orthopaedics*, 2005, 15: 64-69

[ 5 ] Fleute M, Lavallée S, Julliard R. Incorporating a statistically based shape model into a system for computer-assisted anterior cruciate ligament surgery. *Med Image Anal*, 1999, 3: 209-222

[ 6 ] Plaweski S, Pearle A, Granchi C, et al. PRAXIM ACL navigation system using bone morphing: navigation and MIS in orthopedic surgery. In: *Navigation and MIS in Orthopedic Surgery*. Berlin Heidelberg: Springer, 2007. 315-323

[ 7 ] Wolf A, Digioia A M, Jaramaz B, et al. Computer-guided total knee arthroplasty: MIS techniques in orthopedic. In: *MIS Techniques in Orthopedic*. New York: Springer-Verlag, 2005. 390-407

[ 8 ] Shafizadeh S, Paffrath T, Grote S, et al. Fluoroscopic-based ACL navigation: navigation and MIS in orthopedic surgery. In: *Navigation and MIS in Orthopedic Surgery*. Berlin Heidelberg: Springer, 2007. 324-332

[ 9 ] Stulberg S D. CT-free-based-navigation systems: navigation and robotics in total joint and spine surgery. In: *Navigation and Robotics in Total Joint and Spine Surgery*. Berlin: Springer, 2003. 24-38

[ 10 ] Dessenne V, Lavallée S, Julliard R, et al. Computer assisted knee anterior cruciate ligament reconstruction: first clinical tests. *Journal of Image Guided Surgery*, 1995, 1: 59-64

[ 11 ] Stindel E, Briard J L, Merloz P, et al. Bone morphing: 3D morphological data for total knee arthroplasty. *Computer Aided Surgery*, 2002, 3: 156-168

[ 12 ] Stindel E, Briard J L, Lavallée S, et al. Bone morphing: 3D reconstruction without pre- or intra-operative image-concept and application: navigation and robotics in total joint and spine surgery. In: *Navigation and Robotics in Total Joint and Spine Surgery*. Berlin: Springer, 2003. 39-45

[ 13 ] Eichhorn H J. Image-free navigation in ACL replacement with the OrthoPilot system: navigation and MIS in orthopedic surgery. In: *Navigation and MIS in Orthopedic Surgery*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 306-314

[ 14 ] Ishibashi Y, Tsuda E, Fukuda A, et al. Future of double-bundle anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: in-

- corporation of ACL anatomic data into the navigation system. *Orthopedics*, 2006, 29(10 Supple): 108-112
- [15] Panisset J C, Boux D C F. Navigated anterior cruciate ligament reconstruction: correlation between computer data and radiographic measurements. *Orthopedics*, 2006, 29(10 Supple): 133-136
- [16] Koh J, Koo S S, Leonard J, et al. Anterior cruciate ligament (ACL) tunnel placement: a radiographic comparison between navigated versus manual ACL reconstruction. *Orthopedics*, 2006, 29(10 Supple): 122-124
- [17] Julliard R, Plaweski S, Lavallee S. Why navigation on the ACL is important. In: Proceedings of the 3rd Annual Conference of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery, Marbella, Spain, 2003. 170-171
- [18] Pena E, Calvo B, Martinez M A, et al. Influence of the tunnel angle in ACL reconstructions on the biomechanics of the knee joint. *Clin Biomech*, 2006, 21(5): 508-516
- [19] Koh J. Computer-Assisted Navigation and Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Accuracy and Outcomes. <http://www.orthosupersite.com/view.asp?rID=4081>: SLACK Inc, 2005
- [20] Julliard R, Plaweski S, Kirchmeier M, et al. Anatomometric ACL navigation using none morphing: result on 150 patients. In: Proceedings of the 4th Annual Conference of the International Society for Computer Assisted Orthopaedic Surgery, Chicago, Illinois, USA, 2004. 133-135
- [21] 徐卿荣,朱振安.前交叉韧带胫、股骨重建位置变化对等距性的影响.中华创伤杂志,2005,21(2):131-133
- [22] 房建成,全伟,孟小红.基于 Unscented 四元数粒子滤波的微小卫星姿态估计.北京航空航天大学学报,2005,31(3):311-315
- [23] Degenhart M. Computer-navigated ACL reconstruction with the Orthopilot. *Surg Technol Int*, 2004, 12: 245-251

## An ACL reconstruction planning method based on isometry with image-free navigation

Hu Yan, Wang Tianmiao, Hu Lei, Wang Junchen  
(Robotics Institute, BeiHang University, Beijing 100191)

### Abstract

To assure the accuracy of implantation position and the protection of surgeons from X-ray radiation in anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction, an ACL reconstruction planning method based on isometry and image-free navigation was presented and it was implemented with photoelectric tracking. Firstly, an isometric planning strategy was designed according to the isometric theory, which was based on computing the distance change between point-pairs during the tibia rotation around the femur. Then the configuration of the navigation system and the implementations of the key technologies including the coordinate transformation of the operation objects, and the anatomical feature-acquisition and bone surface reconstruction of the knee joint were analyzed respectively. And finally, the experiments on 2 legs of ox were implemented. The results showed that this method was reasonable and effective. The precision of position in anatomical area of femur/tibia was 1.45mm, which can satisfy the requirement of clinical surgery.

**Key words:** computer aided orthopaedics surgery (CAOS), anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction, isometry, photoelectric camera tracking, image-free navigation