

文章编号:1004-7220(2009)04-0290-05

基于 CT 数据的股骨轴线的获取

丁 辉, 刘文博, 王广志
(清华大学医学院 生物医学工程系, 北京 100084)

摘要: **目的** 提出一种利用 CT 影像数据自动获取股骨轴线的方法, 利用该方法可以在计算机上获取精准的股骨三维解剖轴线与机械轴线。**方法** 对人体下肢进行 CT 扫描, 然后对 CT 图像进行二维阈值分割、三维数据体重建、骨骼分组、数据平滑填充及三维数据体旋转等预处理, 获得三维股骨表面模型; 通过对股骨头与股骨远端形态特征的分析, 根据股骨头近似球形的特点, 对判断断层扫描数据梯度变化来计算股骨头中心位置, 另外, 逐层搜索膝关节断层图像上闭环区域的方法自动求得股骨远端中心的坐标, 从而获得股骨长轴。**结果** 建立了一种基于 CT 图像简便快捷的自动获取股骨头中心与膝关节骨中心三维空间坐标的方法。**结论** 通过此方法可较为精确获得人体下肢的三维股骨机械轴线和股骨解剖轴线。

关键词: 股骨轴线; 股骨机械轴线; 股骨解剖轴线; 三维股骨模型; CT 扫描
中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

Scheme to extract femur axes automatically based on CT images

DING Hui, LIU Wen-bo, WANG Guang-zhi. (Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Objective The identification of lower limb axes plays an important role in the kinematics research and clinical operation of total knee replacement surgery. This paper presents a method to extract the femoral axes based on CT images automatically. **Method** Using a series of image pre-processing algorithms such as segmentation, smoothing and rotations of the images, to get the 3-D fine mesh of lower limb bones. Then, by analyzing the morphological feature of 3-D femoral surface and based on the definitions of femoral mechanic axis and femoral anatomical axis, three feature points located on femoral head, femoral distal intercondylar notch and femoral shaft centre are selected to define the mechanical and anatomical axes of femur. In the light of the morphological feature of femur head, the center of femoral head was decided according to the changes of the gradient between each cross section of the femoral head. Meanwhile, we got the center of femoral intercondylar notch by calculating the closed-loop zone of cross sections of the bone. Those two points could finally define the mechanical axis of the femur. **Result** Based on a series of image processing procedures, three dimensional (3-D) surface model of lower limb bone were generated. By analyzing the morphological features of femoral head and knee joint center, a simple and convenient way was proposed to extract the coordinate of three feature points and further the femoral axes automatically. **Conclusions** Experimental results show that this processing procedure can extract the femoral mechanic axis and femoral anatomical axis precisely with 3-D CT images.

Key words: femoral axes; femoral mechanic axis; femoral anatomic axis; 3-D femoral model; CT scans

收稿日期:2008-11-11; 修回日期:2009-06-18

基金项目:国家高技术研究计划项目(2006AA02z4e7);清华-裕元医学研究基金。

作者简介:丁辉(1967-),高级工程师,研究方向:医学图像处理。

通讯作者:王广志,教授, Tel: (010)62783631; E-mail: wgz-dea@tsinghua.edu.cn

人体下肢轴线的准确获取在人工关节置换手术和下肢运动学研究中具有重要的意义。随着人工关节置换技术的发展,越来越多患有膝关节疾病的患者可以接受全膝关节置换手术,期望通过手术在一定程度上恢复行动,缓解疼痛。研究表明^[14]在全膝关节置换手术后,膝关节的耐久性和稳定性与手术中下肢轴线的对齐程度密切相关。而且下肢轴线也是医生整个手术切除过程中的定位基准。通常下肢轴线的确定大多采用 X 光片目测的方式获取,这种方法非常简单,已有相关文献报道^[5,6]。但是由于 X 光片是二维投影图像,用它来描述人体三维骨骼的特征和计算轴线位置会带来较大的误差,进而降低手术的质量。

随着医学影像技术的进步,以及医学图像处理和三维数据重建技术的发展,为获取三维高精度的下肢轴线提供了可能。苏永松等^[7]报道了基于 CT 影像数据,利用髌关节球面中心差值的方法计算股骨头中心点的方法,该点定义为股骨轴线上位点,该方法通过在股骨头外表面用人工点出 6~8 个数据点,并假设股骨头近似一个球体,通过用 2 个三角形外接圆圆心与法向量的方法确定球体中心,即股骨头中心点。Patrick Salvia 等^[8]用膝关节 CT 影像数据进行三维重建,在三维可视化模型中添加标志点来确定轴线。Taka-aki 等^[9]利用 MRI 和 CT 影像数据,给出了在运动中膝关节三维模型的下肢轴线中心点及轴线。黄雪梅等^[10]利用光学定位追踪仪来确定全膝置换中患者的股骨头中心,从而获取股骨力线,在力线的定位精度分析中,采用重建的三维股骨模型进行校验。

本文利用人体下肢的 CT 影像数据,对二维断层切片图像数据进行必要的预处理,获得清晰完整的三维股骨表面模型。通过对三维股骨表面模型的形态特征分析,建立了一种简便快捷的自动获取股骨头中心与膝关节骨中心坐标的方法;经过解算获得了三维空间中较为精确的股骨机械轴线和股骨解剖轴线。

1 材料与方法

1.1 材料

采用两例年龄分别 35 和 40 岁的正常人体下肢 CT(TOSHIBA Aquilion 64 排)Dicom 影像数据,CT 扫描间距 1 mm,分辨率为 512 × 512,像素尺寸为

0.782 mm × 0.782 mm。扫描范围是从股骨顶端到胫骨远端共计 1 000 层左右的断层切片数据。

1.2 数据预处理

为了能从 CT 扫描影像数据中快速、准确地提取与股骨轴线相关的特征点,在做股骨三维模型提取前,必须对原始的二维 CT 数据进行必要的预处理,其步骤主要涉及:图像分割,二值图像的填充与表面平滑,三维数据的重建,骨骼分组及三维数据的旋转变换等。

1.2.1 图像分割 CT 的原始影像数据中包括骨骼、肌肉和软组织等部分,为获取骨骼的三维数据,需对原始的二维 CT 断层图像进行分割处理。

根据骨骼在 CT 图像中灰度值的分布特点,利用“灰度阈值法”对图像进行分割,通过分割与二值化处理,获得了骨骼部分的断层二值图像,分割后的图像中仅包括了骨盆、股骨、胫骨、腓骨、腓骨等与骨相关的信息。在“灰度阈值法”中阈值的选取至关重要,阈值过高会造成过度的分割,特别是对骨质比较疏松的数据会产生股骨头不完整的可能性,反之,将产生不同骨骼之间的黏连,膝关节部分断层的分割结果如图 1 所示。

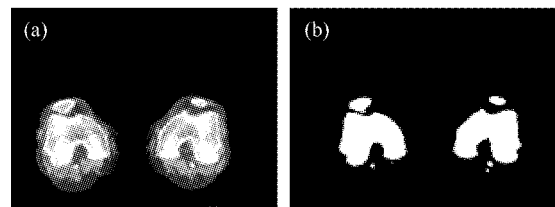


图 1 (a)阈值分割前图像;(b)阈值分割后图像

Fig.1 (a) Original CT image; (b) Threshold segmentation results

1.2.2 平滑与填充 在阈值分割处理后,图像中会产生噪声点,需要进行平滑滤波处理。同时,在股骨髓腔内,或在骨质比较疏松的地方 CT 图像的灰度比较低,经过二值化后会产生空洞,因此,需要对上述各层二值图像做填充处理。通过以上处理得到骨边沿平滑而且闭环区域内单连通的断层二值图像,如图 2 所示。

1.2.3 三维数据体的重建 将上述处理后的二维图像序列进行三维重建,形成三维骨骼表面数据 $F(x, y, z)$ 。

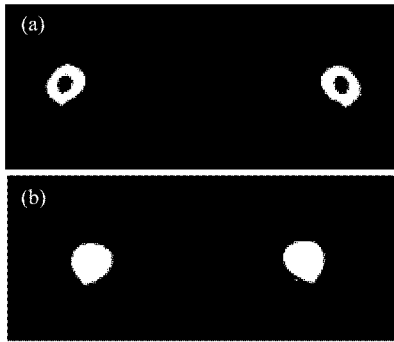


图2 (a)平滑、填充处理前图像;(b)平滑、填充处理后图像

Fig2 (a)Image of pre-filling and smoothing;(b)Image of post-filling and smoothing

1.2.4 骨骼分组 本文的目的是获取股骨轴线,因此,需要对上述三维骨骼表面数据进行自动分组,以获取单独的股骨表面数据,骨骼分组是根据分割后二值图像区域的空间连通性进行判断的,对股骨、胫骨与髌骨分别标记,形成不同骨骼表面数据,并赋予不同的颜色 $F_{femur}(x,y,z)$, $F_{tibia}(x,y,z)$, $F_{patellar}(x,y,z)$, $F_{pelvis}(x,y,z)$ 。

1.2.5 三维数据的旋转变换 考虑到在 CT 影像数据获取中,病人是平躺在 CT 扫描床上进行扫描的,因此,人体长轴处于水平面内,但头脚方向与扫描方向难于做到完全平行,而后续股骨轴线提取算法中,对股骨数据的正位(头脚与扫描方向平行)有较高的要求,因此需要对数据进行必要的旋转变换,以获取正位数据,在此只需考虑水平面内的旋转即可。

如图3所示,由于CT扫描的非正位造成的左右股骨头上沿不在同一水平面上,它们之间存在一个角度 θ ,其角度可通过三维股骨数据中两个股骨头上沿在垂直方向的高度差来确定。通过三维数据

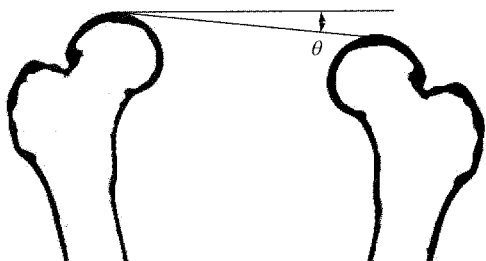


图3 CT扫描非正位造成的左右股骨头上沿偏差角 θ

Fig3 Femoral heads on both sides are not on the same level when a patient is lying flat on the CT bed and thus forms angle θ

的旋转矩阵 R_θ 进行旋转校正,即

$$R_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过上述预处理获得了一套姿态标准、表面平滑、清晰完整的三维股骨表面模型数据。

1.3 股骨轴线获取

股骨轴线是从上面经过预处理后获得的三维股骨数据中求取。股骨的轴线一般有两种描述方法,即股骨机械轴和股骨解剖轴^[1]。

1.3.1 股骨机械轴(femoral mechanic axis, FMA) 是指股骨头中心(见图4中点1)与膝关节中心的连线。而膝关节中心一般选取髁间窝顶点(图4中点3)。因此,求取股骨机械轴的关键是要通过合适的算法,从三维股骨数据中求取股骨头中心与膝关节髁间窝顶点的坐标。



图4 股骨头中心与膝关节中心示意图

Fig4 Anatomical landmarks of the femoral head and femoral intercondylar notch

确定股骨头中心点坐标。图5(a)是从股骨数据中提取的股骨头部分的三维重建图像。从重建的图像中可以看出股骨头是一个近似的球形结构, Gargouri^[7]等也做过专门的描述。而且从二值化断层切片序列数据图5(b)中也可以看出股骨头切面数据的圆形特征。此外还发现球形股骨头水平最大直径位置高出股骨颈(图4中点1和点2比较),因此,在解算该近似球形中心坐标时采取以下方法:

对股骨数据,从股骨头顶端逐片取出预处理后的切片数据,对每片数据骨骼区域求取长半轴,如图5(b),先求出第 i 片二值化图像中骨骼区的长轴半

径 r_i , 然后求下一片数据的长半轴 r_{i+1} , 再求两者之差 $D_i = r_{i+1} - r_i$, 即相邻两片圆形骨数据长半轴梯度。用梯度 D 作为判定条件, 从股骨头形态可知, 球形股骨头水平最大直径位置 (R) 在股骨颈之上, 但两点之间的间距非常近, 当扫描切片数据恰好扫过股骨头中心位置时, 梯度的变化会出现由正到负的转折, 拐点处切片数据的长轴中心坐标 $C_A(x, y)$ 即为股骨头中心坐标。在实际情况中, 由于股骨头水平最大直径截面和股骨颈截面位置非常接近, 如果切片扫描数据不够精细, 有可能出现扫描切片数据没有扫到股骨头中心位置, 这样会导致梯度求取中不出现由正到负的转变, 但是会出现梯度突变 (较大增加), 这是因为过股骨颈后, 骨截面长轴突然增大, 说明切片数据已过股骨颈位置, 因此, 在梯度判断法中还需增加一个阈值 S , 如果梯度 D 变化大于 S , 说明 D 值发生突变, 此切片数据已过股骨颈位置, 则取上一片数据的长轴中心坐标 $C_A(x, y)$ 即定为股骨头中心坐标。

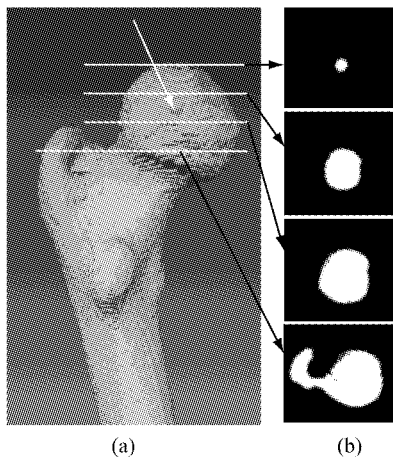


图 5 (a) 股骨头三维重建; (b) 二值化断层切片序列图像
 Fig.5 (a) 3-D model of femoral head; (b) Binary Image of femoral head

图 5(a) 中的箭头所示点即为股骨头透明化处理后看到的由上述算法求得的股骨头中心点。

确定髁间窝顶点坐标。图 6(a) 是从预处理后的股骨数据中提取的膝关节骨部分数据的三维重建图像。从二值化切片序列数据 (见图 6b) 中可以发现, 切片由下向上取片时, 中间骨骼区会出现连通域个数的变化, 最初只有一个独立的连通域, 随着切片数据的上行, 出现两个独立的连通域, 继续上行, 会

出现两个连通域融合成一个连通域。最初的融合点即为膝关节中心髁间窝顶点所在位置, 根据这一特点, 可以采取以下算法。

从膝关节骨下端逐片取出预处理后的切片数据, 逐层搜索股骨断层图像上的闭环区域, 通过搜索算法得到该层数据的连通域边界的数据集 $ConSet [i, x_{(n,m)}, y_{(n,m)}]$, 其中 i 为切片层号, n 为连通域编号, $x_{(n,m)}, y_{(n,m)}$ 为 n 连通域第 m 个边界数据点的坐标。当逐片搜索连通域时, 其连通域编号 n 从 1 变到 2 再变回 1, 当第 2 次出现 $n = 1$ 时, 说明融合点出现在该片上。再提取前一片的数据, 对其不同的连通域边界坐标求取最短距离。

$$D_{\min} = \min | \sqrt{(x_{(1,m)} - x_{(2,k)})^2 + (y_{(1,m)} - y_{(2,k)})^2} |$$

其中: m 属于第 1 连通域, k 属于第 2 连通域。

记录下该最短距离的两端点坐标, 并求出这两点的中点坐标 $C_B(x, y)$, 该点即为膝关节中心髁间窝顶点。

如图 6 中的箭头所示的点即为膝关节做透明化处理后看到的由上述算法求得的髁间窝顶点。

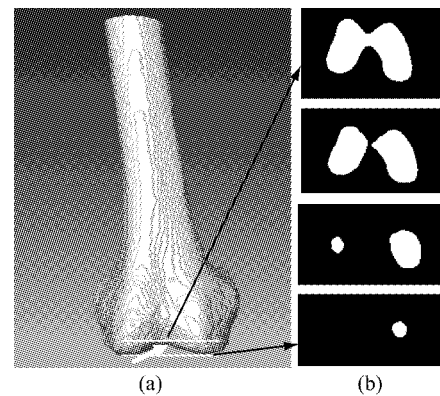


图 6 (a) 股头远端三维模型; (b) 髁间窝截面二值图像
 Fig.6 (a) The 3-D model of knee joint; (b) Binary image of cross section of intercondylar notch

1.3.2 股骨解剖轴线 股骨解剖轴 (femoral anatomic axis, FAA)。常用两种定义方法: ①以股骨全长 (从股骨头上缘到股骨内髁末端的连线) 的 1/2 处骨截面中心点与膝关节中心髁间窝点之间的连线。②在膝关节关节面以上 10 cm 处骨截面长轴中心点与膝关节中心髁间窝点的连线。第 2 种股骨解剖轴定义方法与股骨干中心非常接近, 而且与 TKR 手术中髓内定位杆方向基本一致, 因此本文采用这

种定义方法进行求解。

膝关节中心髁间窝点在求取股骨机械轴时已经获得,所以在求股骨解剖轴时,只需确定膝关节关节面以上 10 cm 处骨截面中心点的坐标即可,该点求解只需取出股骨远端向上 10 cm 处的切片数据,对其求取闭区域的中心点,该点与髁间窝点的连线即为股骨解剖轴线。

图 7 中给出的股骨机械轴线,蓝色线段为所求的股骨解剖轴线。

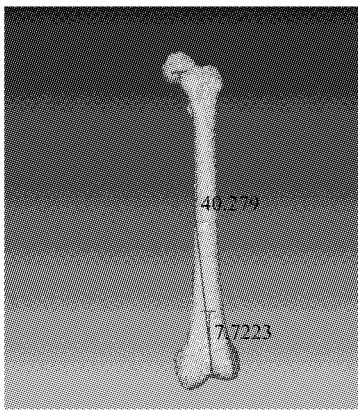


图 7 股骨机械轴线,股骨解剖轴线

Fig.7 The extract result of femoral anatomic axis and femoral mechanic axis

2 结果与讨论

本文利用人体下肢 CT 扫描影像数据,经过对二维切片图像的阈值分割获得了骨骼切片的二值化数据,将此数据做区域填充与平滑处理后、进行三维重建形成三维骨骼表面,再对三维表面数据做骨骼分组,从中抽取股骨表面,考虑到扫描方向的偏差,对股骨数据进行必要的旋转变换,经过上述预处理后,获得一套清晰完整的三维股骨表面数据。

通过对三维股骨表面数据的形态特征分析,结合股骨机械轴线和股骨解剖轴线定义,分别选取了股骨头中心和膝关节中心髁间窝点,以及膝关节关节面以上 10 cm 处骨截面长轴中心点与膝关节中心髁间窝点作为股骨机械轴线和股骨解剖轴线的两对特征点,通过简便快捷的搜索算法获得了这两对特征点的坐标,进而自动获得了股骨机械轴线和股骨解剖轴线。

在确定股骨机械轴线和股骨解剖轴线后,就确定了股骨远端截骨面的法向量,从而控制股骨远端截骨面的方向,并可以依据上述轴线,来确定正确的截骨位置。

这种方法与传统的用 X 光片目测方法相比所求得的轴线具有三维信息。从三维数据中获取的下肢轴线,对全膝置换手术术前模拟,术中导航和术后的评估,下肢运动仿真具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Siston R A, Cromie M J, Gold G E, et al. Averaging different alignment axes improves femoral rotational alignment in computer-navigated total knee arthroplasty[J]. J Bone Joint Surg Am, 2008, 90:2098-2104.
- [2] Fabio Catani, Nicola Biasca, Andrea Ensini, et al. Alignment deviation between bone resection and final implant positioning in computer-navigated total knee arthroplasty [J]. J Bone Joint Surg Am, 2008, 90:765-771.
- [3] Siston R A, Patel J J, Goodman S B, et al. The variability of femoral rotational alignment in total knee arthroplasty [J]. J Bone Joint Surg Am, 2005, 87:2276-2280.
- [4] 吴剑,王友,戴超戎,等.一种动态膝关节软组织平衡测量仪的研制[J].医用生物力学,2006,21(3):217-221.
- [5] Moreland J R, Bassett L W, Hanker G J. Radiographic analysis of the axial alignment of the lower extremity[J]. J Bone Joint Surg (Am), 1987, 69:745-749.
- [6] 王大伟, Nung Lo Nagi, Jing Yeo Seng.全膝关节置换的放射学轴线测量[J].中华骨科杂志,2005,25(9):565-567.
- [7] 苏永松,许忠信,李浩宇,等.先天性髌脱位手术计算机虚拟规划中的测量技术[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(8):1159-1163.
- [8] Patrick Salvia, Stephane Sobczak. Knee kinematics Validation of a re-orientation technique of knee axis[C]//9th symposium on the 3D analysis of human movement. France, 2006.
- [9] Taka-aki Moro-oka. Can magnetic resonance imaging - derived bone models be used for accurate motion measurement with single-plane three-dimensional shape registraton[J]. Journal of Orthopaedic Research, July 2007, 867-872, Wiley Interscience.
- [10] 黄雪梅,王成焘.计算机辅助全膝置换中股骨力线定位精度的实验研究[J].生物医学工程学杂志,2006,23(1):82-84.
- [11] Imed Gargouri. Automated method for clinic and morphologic analysis of bones using implicit modeling technique [C]//Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS. France, August 23-26, 2007.