技术与方法 文章编号:0253-3626(2011)01-0072-04

数字医学在膝关节三维重建中的应用

徐 伟[1],周庭永[1],钱学华[1],刘本菊[1],李林宏[1],张 慧[1],吕发金[2]
(1.重庆医科大学解剖学教研室、法医学与生物医学信息研究室;2.重庆医科大学附属第一医院放射科,重庆 400016)

【摘 要】目的:探索膝关节三维数字化模型的重建及可视化方法。方法:利用 1 例志愿者的右侧膝关节核磁共振成像(Magnetic resonance imaging,MRI)薄层扫描数据,采集二维图像数据,应用 Materialise 公司的交互式医学图像控制系统(Materialises interactive medical image control system,Mimics)软件重建膝关节骨性结构及半月板、交叉韧带、侧副韧带等软组织的三维数字化模型,并对半月板和韧带进行断面测量和模型立体测量。结果:利用 MRI 数据,应用 Mimics 软件成功建立膝关节三维可视化模型,重建的膝关节骨性结构及相关软组织形态逼真,解剖学标志清晰,可以不同颜色、任意组合显示,并可对模型放大、缩小、旋转等全方位观察。对膝关节测量结果数据显示,膝关节相关结构断面测值与重建模型立体测值基本一致。结论:基于 MRI 薄层扫描数据重建活体膝关节三维可视化模型,具有较高的真实性和准确性,并可对其形态结构进行定量观测。重建的膝关节三维模型有助于教学和形态功能研究,并为进一步开展膝关节有限元分析和虚拟仿真手术奠定基础。

【关键词】膝关节;核磁共振成像;数字医学;三维重建
【中国图书分类法分类号】R322.7+2 【文献标志码】A 【收稿日期】2010-09-19

Application of digital medicine in the three-dimensional reconstruction of the knee joint

XU Wei, et al
(*Department of Anatomy, Laboratory of Forensic Medicine and Biomedicine Information, Chongqing Medical University*)

【Abstract】*Objective*: To explore the methods for reconstruction and visualization of three-dimensional (3D) models of knee joint. *Methods*: The MRI thin layer scanning data set of a donor's right knee joint were used; two-dimensional image data were collected. The 3D models of knee joint including the bones, meniscus, cruciate ligaments and collateral ligaments were reconstructed by using Mimics software. The meniscus and ligaments were measured cross-sectionally and tridimensionally. *Results*: The 3D models of knee joint were reconstructed successfully based on the MRI images by

作者介绍:徐 伟(1983-),男,硕士,
研究方向:应用解剖学与断层解剖学。
通信作者:周庭永,男,副教授,Email:ztychina@126.com。

素、甘油三脂、果糖、麦芽糖、蔗糖对 4 种血糖仪测定血葡萄糖结果无明显影响,浓度 >6.25 mg/L 的抗坏血酸引起血糖仪测定结果显著增高,B、C 仪器表现更为明显;但 B 血糖仪抗血红蛋白能力较强,血红蛋白会使其余 3 种血糖仪测定结果显著降低;>10 mmol/ 的半乳糖引起 B 血糖仪测定结果显著增高,其余 3 种血糖仪无明显影响,>5.0 mmol/L 的木糖会使 C 血糖仪测定结果明显增高,其余 3 种影响不明显。

由于血糖仪测定结果受到血细胞压积和不同干扰物的影响,而同一品牌的不同仪器测定结果也存在一定的差别[6-8],因此用血糖仪结果不适宜用来诊断糖尿病,也不适宜用于治疗方案的制定和调整。A、B、C、D 4 种血糖仪性能表现不同,使用者应充分认识自己使用的血糖仪和优点和不足,能正确的评估其测定结果,更好地监测病人的血糖值,从而对糖尿病人的预防和治疗起到积极的指导作用。

参 考 文 献

[1] National Committee for Clinical Laboratory.C30-A2 point-of-care blood glucose testing in acute and chronic care facilities;approved guideline- second edition[S]. NCCLS,EP15-A,2002.
[2] 韩光宇,张 巍,任思坡等.4 种快速血糖仪在糖尿病监测中的分析性能评价[J].当代医学,2009,7(19):115-116.
[3] 郑松柏,张秀明,林莲英,等.5 种即时检验血糖仪的主要分析性能评价[J].检验医学,2008,23(5):454-456.
[4] Burnett RW,D'Orazio P,Fogh-Audersen N,et al.IFCC recommendation,on reporting results for blood glucose[J].Clin Chim Acta,2001,307(1-2):205-209.
[5] 彭 燕,胡 娟,王庆旭.快速血糖仪与生化分析仪测定血糖结果比较的系统评价[J].中国循证医学杂志,2009,9(4):446-451.
[6] 洪燕英,朱旭斌,秦 杰.25 台 POCT 与全自动生化分析仪血糖测定结果比对分析[J].中国医学检验杂志,2009,10(5):298-300.
[7] 彭文娟,郭明卫.罗氏快速血糖仪和生化分析仪测定血糖结果的比较[J].中国医疗前沿,2007,2(13):112.
[8] 孙 云,薛 侃,倪赞明.POCT 血糖仪性能评价[J].上海医学检验杂志,2000,15(3):137-139.

(责任编辑:张学颖)

using Mimics. The model's morph of the bones and soft tissues were vivid and the anatomy signal was limpid. The models reconstructed could be displayed by different colors and combined randomly. The models could also be viewed in any direction by zooming in, zooming out, rotating and so on. The measured data of knee joint revealed that the sectioned information was the same as the spatial ones. *Conclusion*: The 3D models of knee joint which look veridical and accurate can not only be reconstructed explicitly by using MRI lamellate images, but also be measured. The reconstructed 3D models of the knee joint are helpful for anatomy teaching and study, and it can also establish the basis for the finite element analysis and virtual reality surgery.

【Key words】knee joint; MRI; medical digitization; three-dimensional reconstruction

近年来，数字医学已成为现代医学的重要组成部分，数字技术已经渗透到医学的各个领域，促使医学技术向个性化、精确化、微创化方向发展。随着计算机图形图像处理技术的进步，三维重建得到了巨大发展，仿真手术成为研究热点。膝关节是人体最大、最复杂的关节，其复杂的解剖结构和运动方式致使膝关节成为最易受损伤的关节之一。膝关节的数字化三维重建及可视化研究对解剖学和临床诊疗均具有重要意义。对于膝关节的三维重建已有报道，但各家所应用的数据源及采用的重建方法各异[1-5]，本研究利用计算机图像处理软件，通过对 1 例志愿者右侧膝关节核磁共振成像(Magnetic resonance imaging，MRI)薄层扫描数据的三维重建，拟探索膝关节三维数字化模型建立的方法，为进一步行膝关节有限元分析及虚拟手术奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究对象

选取男性志愿者 1 例，年龄 27 岁，身高 178 cm，体重 70 kg，既往无膝关节疾病及外伤史，对其右侧膝关节行 MRI 薄层扫描，知情并同意本研究使用其膝关节扫描数据。

1.2 设备和软件

扫描设备：美国 GE 公司 3.0T 核磁共振扫描仪，GE ADW 4.2 工作站。

个人计算机：AMD Sempron 3800+ CPU，160 G 硬盘，DDR Ⅱ 2 G 内存，NVIDIA GeForce 9500GT 512 M 独立显卡，AL1916 W 19 寸液晶显示器，Windows XP/Professional 操作系统。

应用软件：Materialise 公司的交互式医学图像控制系统(Materialise's Interactive Medical Image Control System，Mimics)10.01，(Materialise 公司，比利时)。

1.3 膝关节 MRI 原始数据采集

男性志愿者取仰卧位，右侧膝关节于伸直位用 3.0T MRI 行薄层扫描。扫描参数：右侧膝关节 M3D/Cube T2 加权像扫描，扫描主平面为矢状面，TR：3 000 ms，TE：118.5 ms，矩阵 288 × 288，得到层厚 1.6 mm 连续图像 168 张，将所得断层数据在 GE ADW 4.2 工作站进行刻盘，存储为 DICOM 3.0 格式。

1.4 膝关节的三维重建

1.4.1 膝关节骨性结构的三维重建 打开 Mimics10.01 应用程序，进入软件工作界面，将膝关节 MRI 图像数据导入 Mimics；利用分割菜单下的动态阈值增长功能(Dynamic region growing)，以股骨图像中任意像素点为基本点创建分割体，形成源蒙罩(Masks)；用形态学操作功能(Morphology operations)中膨胀操作(Dilate)，增加像素点，在源蒙罩基础上形成新的蒙罩；用编辑蒙罩(Edit masks)逐层删除位于其他部位的具有和股骨相同灰度的标记，并补全股骨中未被自动标记的像素；利用计算模型(Calculate 3D)功能计算股骨三维模型。将股骨三维模型输出为标准模板库(Standard template library，STL)格式。应用上述方法依次建立胫骨、腓骨、髌骨的三维模型，并输出为 STL 格式。

1.4.2 膝关节半月板的三维重建 将膝关节 MRI 图像数据导入 Mimics10.01，利用动态阈值增长功能，创建半月板分割体，形成源蒙罩，用编辑蒙罩逐层删除位于其他部位的相同灰度的标记，并补全半月板未被自动标记的像素；利用 Calculate 3D 功能计算半月板三维模型，并输出为 STL 格式。

1.4.3 膝关节韧带的三维重建 将膝关节 MRI 图像数据导入 Mimics10.01，利用动态阈值增长功能，创建前后交叉韧带分割体，形成源蒙罩，用编辑蒙罩逐层删除位于其他部位的相同灰度的标记，并补全未被自动标记的像素；利用 Calculate 3D 功能计算前后交叉韧带的三维模型。利用同样方法计算胫侧副韧带及腓侧副韧带的三维模型。

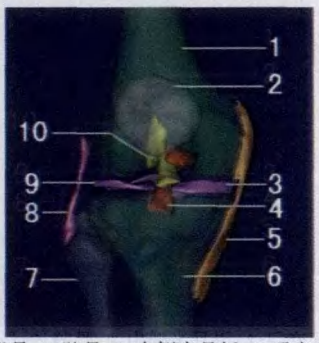
1.4.4 膝关节的三维可视化 将膝关节骨性结构和半月板三维模型的 STL 格式文件导入到膝关节韧带的 Mimics 文件中，检查各模型的质量，应用 FEA 模块中 Remesh 功能进入 Magics9.9 对膝关节各相关结构的三维模型进行光顺处理。

1.4.5 半月板和韧带的测量 应用 Mimics 软件自带测量工具，分别在横、矢、冠三个断面上对膝关节半月板和韧带进行断面测量，同时对重建的膝关节半月板和韧带三维模型进行三维立体测量。

2 结 果

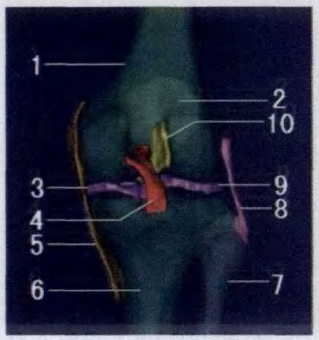
利用 MRI 数据，应用 Mimics10.01 软件，成功建立膝关节三维可视化模型，此模型不仅包括膝关节股骨、胫骨等骨性结构，尚可同时包括半月板、交叉韧带、侧副韧带等软组织结构。所获得的三维模型几何形态逼真、解剖标志明显，通过调节骨性结构的透明度，可以清晰显示韧带、半月板等与外部结构的解剖位置关系。模型可以不同颜色、任意组合显示，

可进行放大、缩小、旋转等多方位观察（如图 1~6）。可将三维模型图像保存为 BMP 或 JPEG 格式，或录制成 AVI 格式的电影输出动态显示，其播放画面清晰流畅。半月板和韧带相关测量结果见表 1、2。



1. 股骨；2. 髌骨；3. 内侧半月板；4. 后交叉韧带；5. 胫侧副韧带；6. 胫骨；7. 腓骨；8. 腓侧副韧带；9. 外侧半月板；10. 前交叉韧带

图 1　全膝关节前面观



1. 股骨；2. 髌骨；3. 内侧半月板；4. 后交叉韧带；5. 胫侧副韧带；6. 胫骨；7. 腓骨；8. 腓侧副韧带；9. 外侧半月板；10. 前交叉韧带

图 2　全膝关节后面观



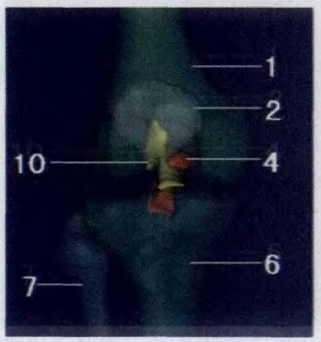
1. 股骨；2. 髌骨；3. 内侧半月板；6. 胫骨；7. 腓骨；9. 外侧半月板

图 3　半月板前面观



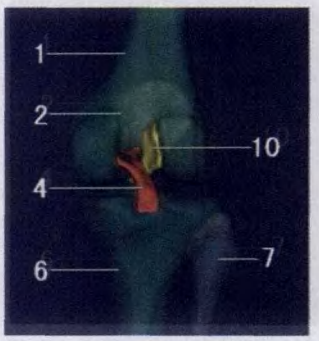
1. 股骨；2. 髌骨；3. 内侧半月板；6. 胫骨；7. 腓骨；9. 外侧半月板

图 4　半月板后面观



1. 股骨；2. 髌骨；4. 后交叉韧带；6. 胫骨；7. 腓骨；10. 前交叉韧带

图 5　交叉韧带前面观



1. 股骨；2. 髌骨；4. 后交叉韧带；6. 胫骨；7. 腓骨；10. 前交叉韧带

图 6　交叉韧带后面观

表 1　膝关节半月板断面和三维测量结果（单位：mm）

		矢径	横径	前角高度	前角宽度	体部高度	体部宽度	后角高度	后角宽度
内侧半月板	断面	39.26	32.58	4.82	19.24	4.25	5.30	3.22	22.16
	三维	43.89	35.13	5.24	18.96	4.50	5.41	4.58	23.63
外侧半月板	断面	33.96	35.78	3.79	21.35	6.35	8.78	5.85	22.21
	三维	35.28	38.54	3.85	24.18	6.96	8.54	5.96	26.79

表 2　膝关节韧带断面和三维测量结果（单位：mm）

		前交叉韧带	后交叉韧带	胫侧副韧带	腓侧副韧带	髌韧带
长度	断面	38.53	40.72	106.20	48.08	53.40
	三维	35.56	41.48	108.73	50.28	56.23
厚度	断面	10.40	10.25	3.75	3.25	3.92
	三维	11.05	10.37	4.02	3.86	4.20

3　讨　论

3.1　膝关节模型的建立方法

膝关节是人体最大最复杂的关节，不仅仅是由于其复杂的解剖学结构，更主要是因其有着复杂无比的生物力学特征。目前，对膝关节生物力学的研究已成为科研热点，建立模型是生物力学研究的关键环节，如何建立一个好的膝关节模型成为膝关节生物力学研究领域的重点。早在 1950 年 Bresler 和 Fankel[6]建立了早期的膝关节生物力学模型，此后学者建立了各式膝关节模型，这些模型基本上可以分为两大类，即物理模型和数学模型。物理模型用来确定关节面接触区或模拟关节的运动，最常见的是将股胫关节运动描述为交叉四连杆机构[7]。该模型可演示膝关节屈曲中股胫关节表面接触点的转换，其作用有限。数学模型可分为现象模型和解剖模型两类，现象模型将膝关节看做一个具有一定生物力学特征的整体，描述总体反应而不考虑关节的真实结构；解剖

模型则考虑膝关节各部分的解剖结构，将膝关节看做由不同生物力学特征单元的组合。有限元法是随着计算机发展而迅速发展的一种现代结构分析的计算方法，膝关节三维有限元模型是基于有限元素法建立的可以对模型各部分赋予材料性质、任意施加外界条件的膝关节模型。此种模型是活体膝关节解剖结构情况的真实再现，为膝关节生物力学研究和虚拟手术的开展提供了必要的条件。

3.2 膝关节 MRI 图像数据的选取与分割

重建膝关节三维模型，其数据来源有断层切片、CT 和 MRI 3 种。断层切片能够获得膝关节薄层图像，所得具有高度的清晰度和解析度，但断层切片图像重建工作量大且步骤复杂。因此在膝关节模型的建立中 CT 和 MRI 扫描图像数据应用更为广泛。CT 图像因对软组织成像较差的限制，无法对膝关节半月板、韧带等结构进行满意的建模。而 MRI 图像数据对骨和软组织能够较好显示，尤其对软组织成像清晰的特点，可以多层面成像和提供三维图像数据，从而在膝关节三维重建中较 CT 具有明显优势。本文利用 MRI 图像成功建立了包含半月板、交叉韧带、侧副韧带等软组织的膝关节三维模型，所得模型形态逼真，能够客观真实反映膝关节的解剖结构。

图像分割是应用图像数据进行三维重建的关键步骤之一，也是难点之一，图像分割的好坏直接影响到三维模型的质量。本文基于 MRI 图像应用 Mimics 软件对膝关节进行重建，与 CT 数据重建不同，Mimics 软件中应用阈值分割建立分割体的图像分割方法对 MRI 并不适用，本研究对 MRI 数据的分割主要采用动态区域增长（Dynamic region growing）、形态学操作（Morphology operations）和手工编辑分割相结合的方法进行。动态区域增长功能可以将在一定灰度阈值内相连的区域连续起来，是分割 MRI 图像数据的主要手段；形态学操作功能可以通过侵蚀、膨胀、开合、闭合等操作来调整分区掩模的形状，从而增加或减少像素形成新的掩模对象；手工编辑功能可以通过添加、擦除等操作修补图像某一区域，添加或减少像素从而使模型完整准确。本文采用自动分割结合手动分割，因为手动分割的随意性和主观性，不可能精确勾画结构轮廓，故最终所得的三维模型表面粗糙，需行模型的光顺处理。人工分割的方法不仅耗时，且提取的结构轮廓较粗糙，故寻求一种计算机自动识别技术来提取感兴趣组织，将会大大推进医学三维建模及虚拟手术的发展。

3.3 膝关节数字化三维重建的意义

膝关节数字化三维重建对解剖学和临床诊疗均具有重要意义。膝关节的数字化重建是对膝关节及周围结构在传统解剖学意义上的补充和发展。传统的解剖学是通过对人尸体的剖切、观察、测量，难免有人为的理想化因素，图谱上的二维平面图像也难以说明人体的三维立体结构。由于受标本数量的限制，传统的解剖学成本越来越高，且标本的软组织还存在水分丢失和变形等问题。而依据影像数据三维重建的膝关节数字化图像是人体膝关节的真实体现，高度真实还原活体的膝关节，且立体直观，重建出的膝关节数字化模型形态逼真、解剖标志明显，真实而形象的反映了膝关节的空间解剖结构和各结构间的关系，且能不同颜色、任意组合和动态显示，可进行放大、缩小、旋转等多方位观察。利用软件测量工具能够在横、矢、冠三个断面上对膝关节相关结构进行二维测量，同时还可以对重建模型进行三维立体测量，所得数值与膝关节断面解剖测量结果基本一致[8]。膝关节数字化重建为解剖学教学提供了新的方法，将数字化模型加载在多媒体教学中，可克服传统解剖教学的不足，使教学形象生动、易于理解，更有利于医学生对相应解剖结构的理解和把握。在三维可视化下研究膝关节及其内的解剖结构、参数，并尝试对膝关节生物力学进行有限元分析，能够为膝关节疾病的诊断治疗、手术方案设计、膝关节假体的设计及开展膝关节虚拟手术等提供可靠的基础条件。膝关节数字化重建能够直观、准确地反映人体膝关节结构，在解剖结构研究、临床疾病诊断、手术方案设计、治疗效果评价及教学等方面将有着广泛的应用前景[9-14]。

参 考 文 献

[1] 万 磊，李义凯，原 林，等.基于中国数字人 CT 数据重建膝关节有限元模型[J].中国骨与关节损伤杂志，2006，21(4)：271-273.

[2] 李鉴轶，赵卫东，余正红，等.膝关节关节软骨的三维构建[J].解剖学杂志，2007，30(6)：695-697.

[3] 潘哲尔，黄加张，顾湘杰，等.磁共振影像膝关节三维有限元模型的建立[J].中国骨与关节损伤杂志，2006，21(4)：268-270.

[4] 米俊达，张绍祥，邱明国，等.膝关节不同功能位断面解剖及三维可视化研究[D].第三军医大学硕士研究生论文，2006.

[5] 黄文华，姜 楠，张美超，等.膝关节计算机三维模型的建立[J].中国医学物理学杂志，2007，24(4)：267-268.

[6] Bresler B，Frankel J P. The forces and moments in the leg during level walking[J].Trans ASME，1950，72：27-30.

[7] Muller W.The knee：form，function and ligament reconstruction[M]. Springer Verlag. New York Berlin Heidelberg：1983.8-13.

[8] 徐 伟，周庭永，钱学华，等.膝关节半月板的三维断面解剖学研究[J].中国临床解剖学杂志，2010，28(3)：272-276.

[9] 扈延龄，金 丹，苏秀云，等.基于三维 CT 数据的髋臼骨折计算机辅助虚拟手术设计[J].中华创伤骨科杂志，2008，10(2)：135-137.

[10] Marchetti C，Bianchi A，Bassi M，et al.Mathematical modeling and numerical simulation in maxillo-faeial virtual surgery（VISU）[J].J Craniofae Surg，2006，17(4)：661-667.

[11] Kato A，Ohno N. Construction of three-dimensional tooth model by micro-computed tomography and application for data sharing[J]. Clin Oral Invest，2009，13(1)：43-46.

[12] 顾洪生，刘尚礼.三维重建技术在脊柱外科中的研究及应用进展[J].骨与关节损伤杂志，2002，17(6)：473-475.

[13] 胡辉莹，何忠杰，吕丽萍，等.应用 Mimics 软件辅助重建人体胸廓三维有限元模型的研究[J].解放军医学杂志，2008，33(3)：273-275.

[14] 李鉴铁，赵卫东，张美超，等.医学影像资料三维重建及在解剖学教学中的应用[J].解剖学研究，2007，29(2)：154-156.

（责任编辑：冉明会）