

MRI中髌关节股头软骨的厚度测量方法

曹宇¹, 赵杰¹, 程远志², 闫继宏¹

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学计算机学院 山东 威海 264209)

【摘要】 为了实现对核磁共振成像中髌关节软骨厚度的自动检测, 该文提出了基于结合高斯滤波的零交叉点的自动测量方法。模拟人体髌关节股头软骨的厚度分布, 建立二维薄面体的数学模型。引入了模拟MR图像摄影过程的点扩散函数模型, 可以模拟出沿薄面体法线方向MR仿真信号的强度波形。利用基于高斯二阶微分的零交叉法可以实现对薄面体厚度的准确测量, 定义薄面体的厚度为沿着薄面体法线方向的高斯二阶微分的两个零交叉点之间的距离。薄面体模型仿真和实物标本实验均验证了该方法的有效性。

关键词 软骨; 数学模型; 核磁共振成像; 点扩散函数; 厚度测量

中图分类号 TP 391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.035

Thickness Measurement of Femoral Cartilage on Hip Joint in MRI

CAO Yu¹, ZHAO Jie¹, CHENG Yuan-zhi², and YAN Ji-hong¹

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology Harbin 150080;

2. School of Computer Science, Harbin Institute of Technology Weihai Shandong 264209)

Abstract A novel method, which is based on the zero-crossing points combined with Gaussian filter, is developed to estimate the cartilage thickness of hip joint automatically in magnetic resonance imaging (MRI). A 2D mathematical model for simulating human hip joint femoral cartilage distribution is founded. Based on the model, a point spread function (PSF) is applied to simulate the MR imaging process, and then the one-dimensional profile of MR intensity values along the normal direction of the sheet structure can be performed. The simulation experiment demonstrates that the thickness of sheet structure can be accurately measured by using the zero-crossing method, where the thickness of sheet structure is defined as the distance between zero-crossing points of the Gaussian second derivatives along the normal direction. Plastic sheet simulation and the vivo experiment verify the validity of the method.

Key words cartilage; mathematical models; MRI; point spread function; thickness measurement

大量的研究需要使用侵入性的方法(如解剖、关节内窥镜等)对关节软骨的厚度和表面状况进行检查^[1-2], 需要破坏病人的表皮组织甚至直接接触关节软骨的表面, 因此, 它们不适用于像关节炎一样的关节疾病的程度检测, 和对软骨损伤的部位进行准确的定位和测量。医学图像处理为无创诊断提供了可能^[3]。X光技术和CT技术虽然可以用于非侵入性的关节组织损伤研究, 但X光技术只能平面成像, 无法提供关节部位的空间几何图像信息; 而CT技术由于其放射性的影响和对软骨组织的不敏感性而受到多种限制。近年来, 临床研究发现, 核磁共振成像(MRI)技术为关节软骨的深入研究提供了一种安全的、非侵入性的有效方法。

多数的研究集中在对于人体膝关节软骨厚度的测量研究上^[4-7], 因为膝关节软骨相对独立, 且厚度值较大, 便于通过多种方法实现准确测量。而对人体髌关节软骨厚度测量的研究则相对较少^[8-9], 因为在人体髌关节处, 髌臼软骨和股骨头软骨通常紧密贴合, 需要通过牵引技术使它们分离后, 才能对软骨的厚度进行测量; 又因各层软骨的厚度相对较薄, 难以用通常的方法如边缘检测等实现准确的测量。

1 二维薄面体的数学模型

本文建立了一个二维薄面体的数学模型, 如图1所示, 图中 τ 为薄面体的厚度, r_o 为沿薄面体法线的方向。使用该模型模拟了一张MR摄影切片图像上

收稿日期: 2008-10-08; 修回日期: 2009-05-10

基金项目: 国家863计划(2006AA04Z245)

作者简介: 曹宇(1981-), 男, 博士生, 主要从事计算机辅助医学图像处理方面的研究。

髌关节股头软骨在理性状况下的厚度分布,如图2所示。在此基础上,引入了一个模拟MR摄影过程的点扩散函数(point spread function, PSF)模型,可以模拟出MR摄影过程中点扩散作用对于理想薄面体厚度分布的影响,进而得到沿着薄面体法线方向MR仿真信号的强度波形。针对该仿真波形,使用基于高斯二阶微分的零交叉法实现对模拟MR摄影作用下薄面体厚度的准确测量,薄面体厚度的定义为沿着薄面体法线方向的高斯二阶微分的两个零交叉点之间的距离。

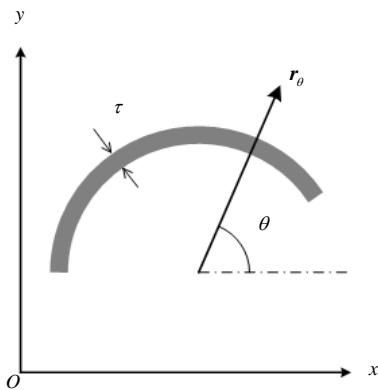


图1 平面薄面体模型图

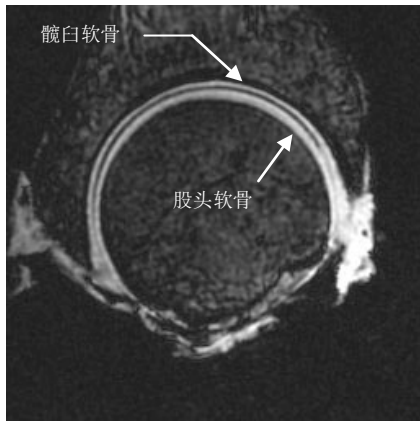


图2 人体髌关节MR摄影切片图像

三维空间中薄面体沿法线方向 x 的一维信号强度函数为:

$$s_0(\mathbf{x}; \tau) = N(x; \tau) \tag{1}$$

式中

$$N(x; \tau) = \begin{cases} H_- & x < -\tau/2 \\ H_0 & -\tau/2 \leq x \leq \tau/2 \\ H_+ & x > \tau/2 \end{cases} \tag{2}$$

τ 为空间薄面体的厚度; H_0 、 H_- 和 H_+ 分别为空间薄面体的MR信号强度及其两侧背景的信号强度,如图3所示。

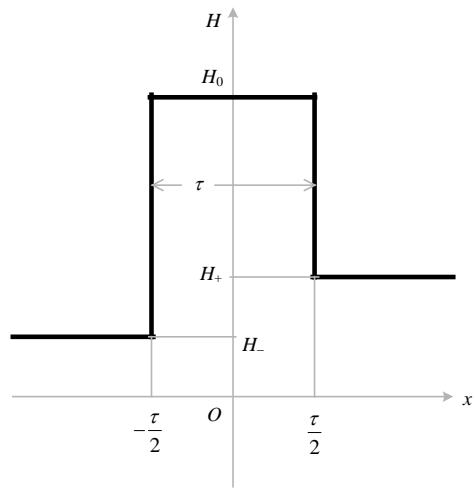


图3 沿薄面体法线方向的一维信号强度函数在 x - y 平面上的薄面体厚度模型为:

$$s(\mathbf{x}; \tau, \mathbf{r}_\theta) = s_0(\mathbf{x}'; \tau) \tag{3}$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}_\theta \mathbf{x} \tag{4}$$

式中 \mathbf{r}_θ 为过薄面体法线方向与 x 轴正方向夹角为 θ 的方向向量; \mathbf{R}_θ 为该方向向量的二阶方阵。

2 MRI的PSF模型

MR摄影图像的一维点扩散函数为^[10]:

$$p(x; \Delta_x) = \frac{1}{N_x} \frac{\sin\left(\pi \frac{x}{\Delta_x}\right)}{\sin\left(\pi \frac{x}{N_x \Delta_x}\right)} \tag{5}$$

式中 N_x 为频域的样本点数; Δ_x 为空间内样本点之间的间隔。式(5)可用下式近似为:

$$p(x; \Delta_x) = \text{Sinc}\left(x; \frac{1}{\Delta_x}\right) \tag{6}$$

式中

$$\text{Sinc}(x; \varpi) = \frac{\sin(\pi \varpi x)}{\pi \varpi x} \tag{7}$$

在 x - y 平面上的二维PSF为:

$$p(\mathbf{x}; \Delta_x, \Delta_y) = p(x; \Delta_x) p(y; \Delta_y) \tag{8}$$

式中 Δ_x 、 Δ_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的样本间隔。

在实际中,二维薄面体沿法线方向 \mathbf{r}_θ 的MR的摄影过程为^[11]:

$$f(\mathbf{x}) = |s(\mathbf{x}; \tau, \mathbf{r}_\theta) * p(\mathbf{x}; \Delta_x, \Delta_y)| \tag{9}$$

式中 $*$ 代表卷积算子。

3 薄面体厚度的测量

如图4所示,本文将类似关节软骨的薄面体的厚度定义为在MR图像上沿薄面体摄影的法线方向上

的两侧边缘的距离。由原理可知,与其他的定义方式(如图像中两侧边缘的最小距离等)相比,本文的定义方式可以得到近乎相同的厚度测量值。在实现方法上,采用基于二阶微分的零交叉法(zero-crossing method)提取法线方向上的薄面体边缘。为了尽量使图像平滑并消除噪声的影响,先用高斯滤波器与图像卷积,再将得到的图像进行二阶微分,提取与薄面体边缘对应的零交叉点。

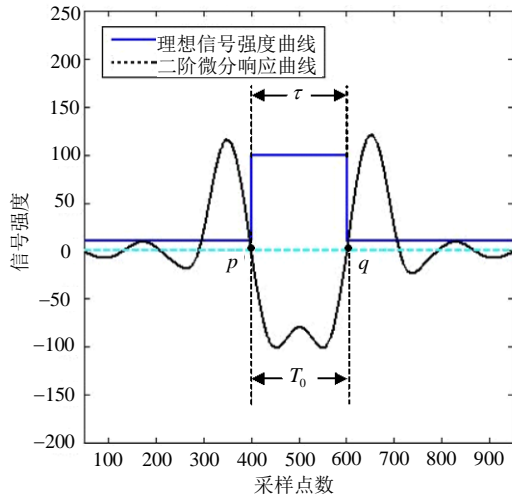


图4 零交叉法测量薄面体厚度示意图

对二维薄面体的MR的摄影函数 $f(\mathbf{x})$ 的高斯二阶微分为:

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}; \sigma) = \nabla^2 [G(\mathbf{x}; \sigma) * f(\mathbf{x})] \quad (10)$$

由卷积的性质可得:

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}; \sigma) = \nabla^2 G(\mathbf{x}; \sigma) * f(\mathbf{x}) \quad (11)$$

式中 $G(\mathbf{x}; \sigma)$ 是标准差为 σ 的二维高斯函数;

$\nabla^2 G(\mathbf{x}; \sigma)$ 为:

$$\nabla^2 G(\mathbf{x}; \sigma) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp(-(x^2 + y^2)/2\sigma^2) \quad (12)$$

则在 x - y 平面上沿 \mathbf{r}_θ 方向的高斯二阶微分为:

$$f''(\mathbf{x}; \sigma, \mathbf{r}_\theta) = \mathbf{r}_\theta^T \nabla^2 f(\mathbf{x}; \sigma) \mathbf{r}_\theta \quad (13)$$

类似地,在 x - y 平面上沿 \mathbf{r}_θ 方向的高斯一阶微分为:

$$f'(\mathbf{x}; \sigma, \mathbf{r}_\theta) = \mathbf{r}_\theta^T \nabla f(\mathbf{x}; \sigma) \quad (14)$$

式中

$$\nabla f(\mathbf{x}; \sigma) = \nabla G(\mathbf{x}; \sigma) * f(\mathbf{x}) \quad (15)$$

确定薄面体厚度的计算过程可由对方向为 \mathbf{r}_θ 的直线上 $f''(\mathbf{x}; \sigma, \mathbf{r}_\theta)$ 和 $f'(\mathbf{x}; \sigma, \mathbf{r}_\theta)$ 两条曲线的分析来实现。直线和曲线的方程分别为:

$$\mathbf{x} = k\mathbf{r}_\theta \quad (16)$$

$$f''(k) = f''(k\mathbf{r}_\theta; \sigma, \mathbf{r}_\theta) \quad (17)$$

$$f'(k) = f'(k\mathbf{r}_\theta; \sigma, \mathbf{r}_\theta) \quad (18)$$

式中 k 为沿 \mathbf{r}_θ 方向的直线位置参数; $f''(k)$ 为沿 \mathbf{r}_θ 方向的高斯二阶微分曲线; $f'(k)$ 为沿 \mathbf{r}_θ 方向的高斯一阶微分曲线。在 $f''(k)$ 的零交叉点 ($f''(k) = 0$) 中,对应 $f'(k)$ 分别具有最大值和最小值的点位置 ($k = p, k = q$) 为薄面体的两侧边缘。零交叉法测量薄面体厚度如图4所示,薄面体的测量厚度为:

$$T_0 = |p - q| \quad (19)$$

在仿真实验中,薄面体厚度 $\tau = 1.8 \text{ mm}$, 零交叉法测量厚度 $T_0 = 1.84 \text{ mm}$, 相对误差仅为2.2%。

4 仿真和实验

4.1 薄面体模型仿真实验

为了验证本文方法的有效性,使用由聚乙烯板制作的模型,由4块 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的聚乙烯板构成,它们的真实厚度分别为 $\tau = 3 \text{ mm}$ 、 $\tau = 1.5 \text{ mm}$ 、 $\tau = 1 \text{ mm}$ 、 $\tau = 2 \text{ mm}$ 。聚乙烯板被平行放置,每块聚乙烯板之间有 30 mm 的距离。通过MR图像摄影以及图像处理的方法测定其厚度,与真实的模型厚度进行比较得出结果。MR图像的摄影条件如下:核磁共振图像在 1.5 T MR 系统(GE Medical System, Waukesha)完成,使用了单边表面盘绕(TORSO, General Electric, Milwaukee, WI),在稳定的状态下,使用三维脂肪抑制快速梯度回波序列完成图像摄影,摄影成像如图5所示。摄影参数如下:重复时间(TR)/回波时间(TE)为 $12.8/5.6 \text{ ms}$, 倾角为 5° , 视场大小(FOV)为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 成像分辨率为 256×256 , 断层图像间距离为 1.5 mm , 成像信号数量为2, 成像时间为 $6 \text{ min} 34 \text{ s}$ 。

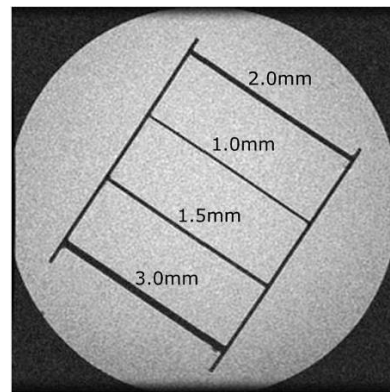


图5 聚乙烯板模型在MR下的摄影图像

该模型的实验结果如图6所示。由实验结果可知,33个采样位置的测量厚度基本反映出了薄面体的真实厚度,最大误差不超过 0.2 mm , 平均误差不超过 0.06 mm 。对于厚度不同的薄面体,绝对测量误差稳定,相对测量误差随薄面体厚度的增加而减小。

测量厚度总体大于真实厚度,这是由于MR摄影下点扩散作用的影响。

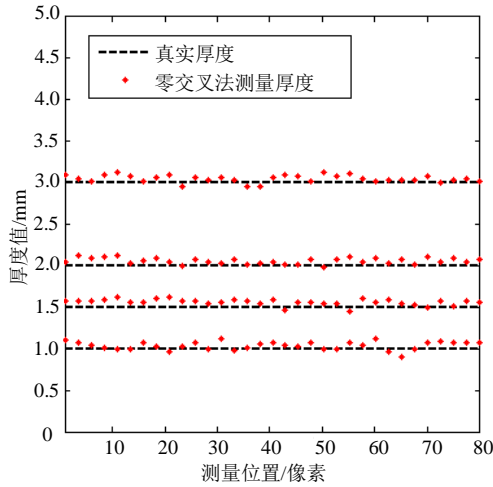


图6 聚乙烯板模型厚度测量结果

4.2 实物标本实验

本文选取一个成年男性(35岁左右)右侧盆骨髌关节标本,在1.5 T的核磁共振机器上(GE, HDe MR system)采用快速扰相梯度回波序列(fast spoiled gradient-echo sequence, FSPGR)对该人体髌关节标本进行矢状方向的摄影成像,摄影效果如图2所示。摄影参数如下:重复时间(TR)/回波时间(TE)为10.4/4.8 ms,倾角为15°,视场大小(FOV)为160 mm×160 mm,成像分辨率为256×256,断层图像间距离为1.6 mm,成像信号数量为2,成像时间为4 min38 s。

在完成对标本的MR摄影后,本文将股头从髌臼中分离出来,并沿摄影平面的方向在对应的标记处对股骨头进行解剖学片层处理,图7为片层处理后的股头软骨截面图。从图中可以清晰地观察到股头软骨内外边缘,在电子显微镜下可以获得任意位置的软骨解剖学测量值。



图7 股头软骨的解剖截面图

采用本文的测量方法对6幅切片图像上共60处(每幅10处)标记位置进行股骨头软骨厚度测量,将测得的数据与对应位置的解剖学测量值进行比较,如图8所示。统计分析结果显示,两组数据具有良好的线性度($y = 0.98x + 0.02$)和高度的相关性($r=0.998, p$

< 0.001)。

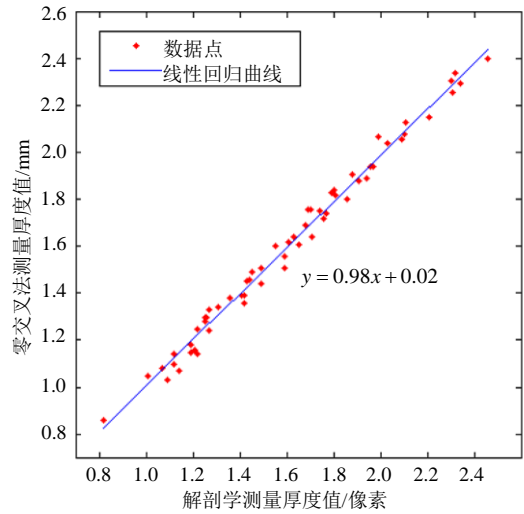


图8 软骨厚度测量结果分析

5 结论

本文通过建立平面薄面体数学模型和引入点扩散函数模型,在数值上模拟了MR过程对于人体髌关节股头软骨厚度分布的影响,得到沿着薄面体法线方向MR仿真信号的强度波形;并应用结合高斯二阶微分的零交叉法对该波形进行了厚度测量,准确地得到平面薄面体的厚度,在理论上充分证明了零交叉法在基于MR图像的人体髌关节软骨厚度测量上的有效性。模型仿真和标本实验结果均验证了本文提出的方法。

感谢哈尔滨市卫生学校人体结构学实验室候涛为本文工作提供的标本及相关的帮助,以及哈尔滨医科大学附属第四医院医学影像科张同、刘芳对本文工作的大力协助。

参 考 文 献

[1] KURRAT H J, OBERLANDER W. The thickness of cartilage in the hip joint[J]. *Anat*, 1978, 126: 145-155.

[2] JURVELIN J S, RASANEN T, KOLMONEN P, et al. Comparison of optical, needle probe and ultrasonic techniques for measurement of articular cartilage thickness[J]. *Biomech*, 1995, 28: 231-235.

[3] 田 娅, 饶妮妮, 蒲立新. 国内医学图像处理技术的最新动态[J]. *电子科技大学学报*, 2002, 31(5): 485-489.

TIAN Ya, RAO Ni-ni, PU Li-xin. Trends of domestic medical image processing[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*. 2002, 31(5): 485-489.

[4] GOUGOUTAS A J, WHEATON A J, BORTHAKUR A, et al.

- Cartilage volume quantification via live wire segmentation[J]. *Acad Radiol*, 2004, 11: 1389-1395.
- [5] PELLETIER J P, RAYNAULD J P, ABRAM F, et al. A new non-invasive method to assess synovitis severity in relation to symptoms and cartilage volume loss in knee osteoarthritis patients using MRI[J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2008, 16(3): 8-13.
- [6] KOO S, ANDRIACCHI T P. A comparison of the influence of global functional loads vs. local contact anatomy on articular cartilage thickness at the knee[J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(13): 2961-2966.
- [7] SABINE W, THOMAS M, WILLHELME H, et al. Quantitative assessment of patellar cartilage volume and thickness at 3.0T comparing a 3D-fast low angle shot versus a 3D-ture fast imaging with steady-state precession sequence for reproducibility[J]. *Invest Radiol*, 2006, 41: 189-197.
- [8] NISHII T, SUGANO N, SATO Y, et al. Three-dimensional distribution of acetabular cartilage thickness in patients with hip dysplasia: a fully automated computational analysis of MR imaging[J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2004, 12(8): 650-657.
- [9] TAKAO M, SUGANO N, NISHII T, et al. Application of three-dimensional magnetic resonance image registration for monitoring hip joint disease[J]. *Magn Reson Imaging*, 2005, 23: 665-670.
- [10] PARKER D L, DU Y P, DAVIS W L. The voxel sensitivity function in fourier transform imaging: Applications to magnetic resonance angiography[J]. *Magn Reson Med*, 1995, 33(2): 156-162.
- [11] STECKNER M C, DROS D J, PRATO F S. Computing the modulation transfer function of a magnetic resonance imager[J]. *Med Phys*, 1994, 21(3): 483-489.

编辑 黄莘

(上接第595页)

- [10] ZAKI M J. Scalable algorithms for association mining[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2000, 12(3): 372-390.
- [11] 王晓峰. 一种有效的频繁项双空间挖掘方法[J]. *计算机工程*, 2007, 33(11): 29-30.
WANG Xiao-feng. Efficient dual space search algorithm for mining frequents[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(11): 29-30.
- [12] LIU Pei-qi, LI Zeng-zhi, ZHAO Yin-ling. Effective algorithm of mining frequent itemsets for association rules[C]//Proc of the 3rd Int'l Conf on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 1447-1451.
- [13] 杨加喜, 李磊, 王育民. 可公开验证的安全电子拍卖方案[J]. *电子科技大学学报*, 2008, 37(1): 24-26.
YANG Jia-xi, LI lei, WANG Yu-min. Publicly verifiable secure electronic auction[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 37(01): 24-26.
- [14] CHENG Chi-tsun, TSE Chi K, LAU F CM. et al. A tree-based data collecting network structure for wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 6(3): 274-278.
- [15] 陈敏, 李晓峰. IN CS-2中CPH的研究与相关业务实现[J]. *北京邮电大学学报*, 2006, 29(9): 149-153.
CHEN Min, LI Xiao-feng. The research of convergent service description and creation approach in NGN[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2006, 29(9): 149-153.

编辑 熊思亮