

基于 CT 图像的眼部组织重建*

戴培山^{1△}, 王博亮²

(1. 中南大学 信息物理工程学院 生物医学工程研究所, 长沙 410083; 2. 厦门大学 计算机系, 厦门 361005)

摘要: 以眼部组织 CT 图像为基础构建眼部组织三维模型, 帮助医生从多方位观察眼部组织结构并对感兴趣区域进行定性和定量分析。我们提出了一种利用 CT 图像重建眼部三维结构的方法。通过图像分割和三维重建, 构建了眼部组织的三维模型。并对计算机辅助测量眼眶容积的方法进行了改进。利用该方法重建了眼部各组织的三维模型, 计算了眼眶容积。本方法建模速度比较快, 建模比较精确。眼眶容积计算与目前使用方法相比, 大量节省了医生的精力。

关键词: 眼部组织 CT 图像; 图像分割; 图像重建; 眼眶容积测量; 眼组织三维模型

中图分类号: TP 391. 41; R318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-6278 (2010) 02-0073-06

Eye Tissue Reconstruction based on CT Image

DAI Peishan¹, WANG Boliang²

(1. Institute of Biomedical Engineering, School of Info- physics & Geometrics Engineering,

Central- South University, Changsha 410083, China; 2. Dept. of Computer, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Reconstructing three- dimensional models of eye tissue by CT image to help doctors in multi- level observation of eye tissues, anglicizing interested area qualitatively and quantitatively. A method of reconstructing three- dimensional model of eye tissues was proposed. Through image segmentation and reconstruction, the three dimensional models of eye ball were constructed. The computer aided volumetric measurement of human orbit method was improved. Three- dimensional models of eye tissues were constructed and the orbital volume was measured. The model constructing speed is fast and the models are precise. Comparing with the common computer aided volumetric measurement of human orbit, the method is simple, fast, and saving much energy of doctors.

Key words: CT image of eye; Image segmentation; Image reconstruction; Orbital volume measurement; Eye 3d model

1 引言

CT 检查是眼科常用检查手段, 可以用于: 眼内异物和肿瘤诊断和定位^[1]、眼外肌 CT 检查^[2]和眼眶容积测量^[3]。其中, 眼眶容积是眼部组织病理检查的重要参数。眼眶爆裂骨折、眶内肿物等疾病, 均能改变眼眶容积, 眼球突出和内陷与眼眶容积的改变有密切关系。测量眼眶容积的改变程度, 对于眶内肿物摘除术后眶内填充物填入量的估计以及由于爆

裂骨折致眼眶容积扩大造成眼球内陷的修复, 均具有重要意义。已证实, 眼眶容积的改变是导致眼球内陷和复视的主要原因^[4]。

利用 CT 图像重建眼部组织为医生从多方位观察眼部组织结构并对感兴趣区域进行定性和定量分析提供帮助。Bondiau^[5]等利用 CT 图像重建了眼部组织。建立模型可以用于分析眼部疾病的质子治疗计划。薛新生等^[6]分别利用填砂和 CT 扫描方法进行了眼眶容积测算, 证明计算机辅助 CT 图像测量

* 中南大学理科发展基金资助项目 (09SDF03)

△ 通信作者 Email: daipeishan@yahoo.com.cn

眼眶容积结果精确, 准确性高。朱昀等^[7]利用混合水平集模型分割颅面整复的眼眶。指出分割结果可以用于眼眶容积计算, 但并未说明具体方法和结果。Lamecker^[8]等提出了一种三维眼眶形状分析的方法。其中, 测量眼眶容积的方法采用重建眼眶组织后再将孔洞填补的方法来实现, 但三维模型孔洞的填补需要手工进行, 要花费大量精力与时间。

我们设计了利用 CT 图像重建眼部的眼眶骨组织、眼球内组织、周围软组织(主要是眼外肌)和眼眶容积区域三维结构的方法。希望帮助医生对眼球及周围组织作详细观察, 为眼部各种疾病的诊断和手术治疗方案制定提供准确的个体信息, 提高眼科疾病的诊断治疗水平。

2 眼部组织 CT 图像分割

图 1 是一幅眼部组织 CT 图像的局部, 可以看到眼球部分的灰度值相对比较均匀, 但是其灰度区间与其他软组织的灰度区间有交叠。因此, 利用阈值方法不能很好的分离出眼球组织。眼球组织的边缘相对比较清晰, 利用如 Canny 算子这样的分割方法可以提取出眼球边界, 但是同时提取出来的边界还有骨组织的边界, 软组织与背景的边界等。这样很难分析舍弃其他无关的边界信息。

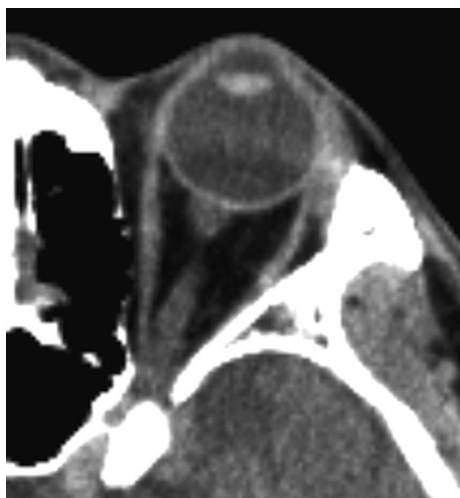


图 1 眼部组织 CT 图像

Fig 1 CT image of human eye

利用常用医学图像分割算法对该图像的眼球分割效果见图 2。可见到直接应用常用的医学图像分割算法不能很好地将眼球组织从背景图像中分割出来。这里水平集算法被用来分割眼球, 阈值分割被用来分割眼眶骨组织, 眼眶容积图像和眼部软组织图像的分割采用多边形选取区域与阈值和形态学方

法相结合的方法进行分割。

2.1 水平集算法分割眼球

2.1.1 水平集分割算法 水平集 (level set) 方法主要是从处理封闭运动界面随时间演化过程中几何拓扑变化的有效的计算工具。Malladi^[9]对水平集在图像分割中的应用做了深入研究。在水平集算法分



图 2 常用医学图像分割算法分割 CT 图像眼球组织结果 (a)Canny 算子边缘检测结果; (b) Neighborhood Connected 算法分割结果; (c) Connected Threshold 分割算法; (d) Otsu 自动阈值分割算法

Fig 2 Segmentation result of CT image using common medical image segmentation algorithms

割图像中, 水平集轮廓上的每一个点的一定方向可以根据下面的方式来运动:

(1) 使得该轮廓朝能量自小的方向运动

$$E(v_i) = \alpha E_{image}(v_i) + \beta E_{contour}(v_i) \quad (1)$$

(2) 或者沿着运动速度的方向运动

$$F(v_i) = \alpha F_{image}(v_i) + \beta F_{contour}(v_i) \quad (2)$$

其中, $E_{contour}$ 和 $F_{contour}$ 分别代表轮廓内部能量和轮廓运动速度。 E_{image} 和 F_{image} 分别代表轮廓图像本身的势能场和图像本身的梯度速度。

令 $\varphi(\bar{X}, t)$ 为水平集函数。其中 $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为多元变量, t 为时间变量。 Φ 的零水平集函数为:

$$Y(t) = \{\bar{X} | \Phi(\bar{X}, t) = 0\} \quad (3)$$

$$\Phi(\bar{X}, t) = 0 \quad (4)$$

对方程两边求对的偏导数得:

$$\Phi + \frac{\partial \Phi}{\partial X} \cdot \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

其中: $\frac{\partial \Phi}{\partial X} = |\nabla \Phi|$, $\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = F$ 这里 F 表示的 \bar{X} 的

速度, 被称为速度函数。

于是有:

$$\Phi + F |\nabla \Phi| = 0 \quad (6)$$

该方程是水平集算法的基本方程, 通常称为 Hamilton-Jacobi 方程。

将公式(2)代入公式(6)得:

$$\Phi = -(\alpha F_{image} + \beta F_{contour}) |\nabla \Phi| \quad (7)$$

其中的 F_{image} 和 $F_{contour}$ 可以分别用图像的梯度 g (I) 和水平集曲线上的曲率 k 来代表。于是有:

$$\Phi = (\alpha g(I) - \beta k) | \nabla \Phi \quad (8)$$

其中, 曲率 k 可以直接从水平集函数中得出。水平集函数沿着 $\gamma(t)$ 都是同样的值, 所以, 所有的微分都为零, 对弧长求二阶偏导数, 得到下面的方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial s^2} &= \frac{\partial}{\partial s} (\Phi_{x_s} + \Phi_{y_s}) \\ &= \Phi_{xx} x_s^2 + 2 \Phi_{xy} x_s y_s + \Phi_{yy} y_s^2 + \Phi_{x_{ss}} + \Phi_{y_{ss}} \quad (9) \\ &= \Phi_{xx} x_s^2 + 2 \Phi_{xy} x_s y_s + \Phi_{yy} y_s^2 + \langle \nabla \Phi, \gamma_{ss} \rangle \\ &= 0 \end{aligned}$$

零水平集对应的曲线曲率 k 为:

$$k = \frac{|\nabla \Phi|}{|\nabla \Phi|} = \frac{\Phi_x \Phi_y^2 - 2 \Phi_y \Phi_x \Phi_y + \Phi_y \Phi_x^2}{(\Phi_x^2 + \Phi_y^2)^{3/2}} \quad (10)$$

为了实现水平集方法, 必须利用数值近似来求解, 一般用有限差分法, 使定义在连续空间的偏微分方程能有效地在离散空间解决问题, 并具有较强的稳定性。在估计运动方程中出现的法向量、梯度向量和曲率值时, 需要用到水平集函数的一阶和二阶微分, 所以, 要对其利用数值方法进行近似求解。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} \approx \frac{\Phi_{i,j}^{t+1} - \Phi_{i,j}^t}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} |\nabla \Phi|^2 &\approx \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \\ &\approx \left[\frac{\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i-1,j}}{2 \Delta x} \right]^2 + \left[\frac{\Phi_{i,j+1} - \Phi_{i,j-1}}{2 \Delta y} \right]^2 \quad (12) \end{aligned}$$

将其带入方程 (6), 可以得到下面的离散方程^[10]:

$$\Phi_{i,j}^{t+1} = \Phi_{i,j}^t + F \left[\left(\frac{\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i-1,j}}{2 \Delta x} \right)^2 + \left(\frac{\Phi_{i,j+1} - \Phi_{i,j-1}}{2 \Delta y} \right)^2 \right] \Delta t \quad (13)$$

2.1.2 眼球分割结果与分析

这里以图 1 为例分析了水平集分割算法分割眼球组织的结果。图 3 是迭代步长 $\tau = 3$ 的眼球 CT 图像水平集分割。可以看到迭代次数为 $k = 180$ 次以后, 轮廓的变形基本稳定下来。零水平集曲线紧紧地贴在眼球内壁上。实验表明 $\tau = 6$ 时会产生过度分割。

2.2 分割出眼眶骨组织

利用阈值分割方法分割出眼眶骨组织。阈值分割是最常见的、并行的直接检测区域的分割方法, 它将图像分为目标和背景两大类。特点是计算简单, 而且总能用封闭且连通的边界定义不交叠的区域, 可以简单地用一个或几个阈值将图像的灰度直方图

分成几个类, 认为图像中灰度值在同一个灰度类内的像素属于同一个物体, 反之则被排除在物体之外。CT 图像的骨组织一般灰度值比较高且比较统一, 非常适合使用阈值分割算法。

图 4 是对图 3(a) 的眼部 CT 图像进行阈值分割的结果, (a)、(b)、(c) 的阈值分别为 160、200 和 240。

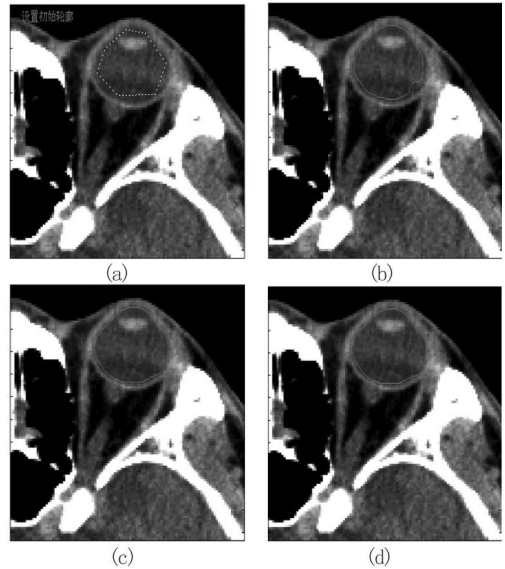
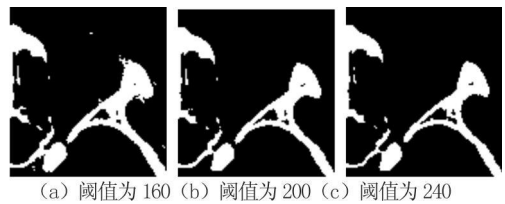


图 3 迭代步长的眼球 CT 图像水平集分割
(a) 一幅眼部 CT 图像; (b) 水平集迭代次数 $k = 60$ 次的结果; (c) 水平集迭代次数 $k = 180$ 次的结果; (d) 水平集迭代次数 $k = 300$ 次的结果

Fig 3 Segmentation results of human eye CT image using level set algorithm with iterative step



(a) 阈值为 160 (b) 阈值为 200 (c) 阈值为 240

图 4 眼眶骨组织阈值分割

Fig 4 Segmentation results of human orbit

可以看出阈值 160 偏低, 使得分割后右边的眼眶组织表面有毛刺, 阈值 240 的分割使左边与鼻腔相连的筛骨点没有分割出来。因此, 我们取阈值 200 对眼眶骨组织进行分割。

2.3 分割眼球周围软组织

在眼部 CT 图像上, 眼眶和眼球下方的部分为软组织, 因为它与头部其他软组织的灰度范围均重叠在一起, 直接提取非常困难。

通过观察, 我们发现眼球后部的软组织紧贴在眼眶骨组织上。如果从眼部 CT 图像上去除周围骨组织, 那么眼球周围的软组织就基本和周围组织分

离出来了。对于连接眼睑和鼻子部分的连接及眼眶骨上的孔洞部分,我们采用多边形限制范围的方法分割出来。

图 5 是分割眼球周围软组织的实验结果。软组织已经基本与周围组织分离。图 5(b) 多边形为选取的眼部组织。这里我们只需要在眼组织周围勾画一个简单的多边形即可。由于骨组织紧贴着眼球软组织边界,并且原来骨骼所在为止的灰度值为零,因此,去除多边形外组织后,眼球的软组织自然被分割出来。

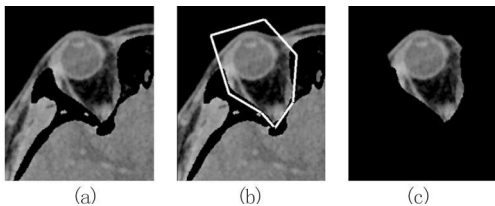


图 5 分割眼球周围软组织

(a) 置黑 CT 图像上骨骼组织; (b) 选眼部组织的多边形; (c) 分割出的眼周围软组织

Fig 5 Segmentation results of human eye soft tissue

2.4 分割眼眶容积测量中需要描绘的区域

2.4.1 传统的分割眼眶容积方法 目前,对眼眶容积测量的方法主要有手工测量和计算辅助三维 CT 测量两类方法:

手工测量方法:用骨蜡封闭干颅眼眶所有孔隙,以眼眶骨性眶缘为界填充石英砂(40 目),测量石英砂容积,即为眼眶的实际容积,测量 3 次,取平均值。

计算机辅助三维 CT 测量方法:颅骨 CT 扫描,将 CT 数据以 DICOM 格式输入软件,在轴位图像上进行眼眶边界描绘。前界为由眶外壁前缘至眶内壁前缘连线,然后沿眼眶骨性边界向后至视神经孔为止,见图 6。所有层面边界描绘完成后,软件自动生成三维重建模型,并计算眼眶容积^[11]。

上述方法中,手工测量方法显然不适合对活人进行操作;而第二种方法,在描绘眼眶外轮廓时需要耗费大量时间和精力。

2.4.2 分割需要描绘出的区域 我们对计算机辅助测量的方法进行了改进。在原图像上骨组织赋值为黑色,很容易选取眼眶填砂平面的线段两点,即眼眶内壁前缘和眼眶外壁前缘。然后利用多边形选取几个关键点,可以快速选取眼眶容积所在位置,见图 7(b)。多边形以外的组织设置灰度值为零,见图 7(c)。由于骨组织紧贴着眼球软组织边界,并且原来骨骼所在位置的灰度值为零。因此,去除多边形外组织后,眼眶容积部分自然被分割出来。

尽管从视觉上看到分割出的眼眶容积图像眼外肌中间充满空隙,但是只要取一个非常低的阈值,即可以分离出眼眶内容积部分。对于在阈值分割后出现孔洞,见图 7(d),只要进行简单的形态学操作即可以填充,见图 7(e)。分割出每幅图像的眼眶内容积部分,重建分割出的序列,即可得到眼眶容积。

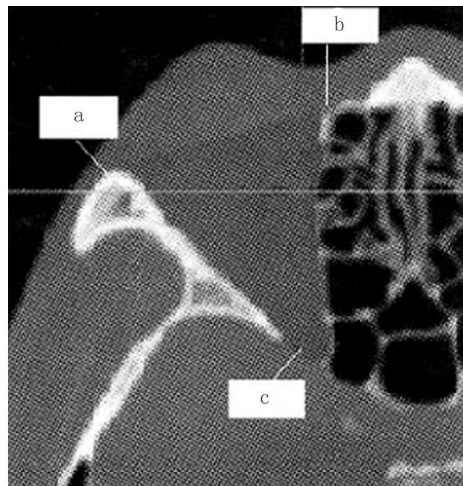


图 6 眼眶 CT 图像眶壁描绘方法(描画时由眶外壁前缘至做连线,然后沿眼眶骨性边界向后至视神经孔为止)

a. 眶外壁前缘; b. 眶内壁前缘; c. 视神经孔

Fig 6 The method of tracing the edge of human orbit on CT image

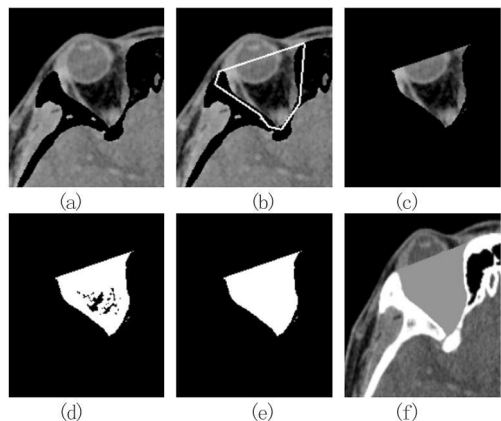


图 7 眼眶容积图像分割

(a) 去除眼眶骨组织后的图像; (b) 多边形选取轮廓图像; (c) 清除多边形外组织的图像; (d) 以灰度 1 为灰度值的阈值分割结果; (e) 利用形态学操作后的眼眶容积图; (f) 将眼眶容积图叠加到原始 CT 图像上的结果

Fig 7 Human orbit image segmentation results

该方法使费时费力的描绘步骤通过选取简单的多边形来代替,明显提高了容积图像分割速度,简化了操作过程。改进的计算机辅助测量方法,使医生甚至是对于眼眶解剖知识不熟悉的人员都可以非常简便的操作,从而大量节省了专业人员的时间和

精力。

3 重建眼部组织

序列图像重建算法主要分为体绘制算法和面绘制算法^[12]。体绘制算法可以看到组织内部结构, 面绘制算法绘制的图形边界轮廓清晰。

对于眼球和眼周围软组织的部分, 希望重建出的三维模型可以观察其内部结构, 这里采用 Ray casting 算法体绘制眼及周围软组织。对于眼眶骨组织和眼眶容积部分区域, 我们最关心的是其轮廓信息, 这里采用消除二义性的 Marching Cubes 算法来绘制眼眶骨组织和眼眶容积。

4 实验结果与分析

根据上述建模方法, 本研究对福建省肿瘤医院获取的具有正常眼解剖组织的四十二岁的男性的 CT 图像进行了建模, 并利用改进方法测量了眼眶容积。

重建的眼部组织见图 8。

眼眶容积的计算中, 得到左眼的体素个数为 61 323 个, 右眼的像素个数为 61 456 个。从 CT 图像文件头信息可知像素与真实尺寸(毫米)的比例为:

PixelSpacing: X 方向: 0. 6650, Y 方向: 0. 6650。层间距为: 1 mm。

测得左眼眶容积:

$$61323 \times (0.6650\text{mm})^2 \times 1\text{mm} = 27118\text{mm}^3 \quad (14)$$

右眼眶容积:

$$61456 \times (0.6650\text{mm})^2 \times 1\text{mm} = 27177\text{mm}^3 \quad (15)$$

葛坚^[13]指出, 眼眶容积的平均值为: 男性 28 ml, 女性 25. 1 ml。可以看出我们所测量的左右眼的眼眶容积差距很小, 与男性眼眶容积的平均值也非常接近。

利用虚拟人切片图像^[14]可以得到较精细的眼部组织图像。图 9 为通过虚拟人切片重建的眼部图像。由于图像是从切片获得, 不能得到在体眼球的信息。

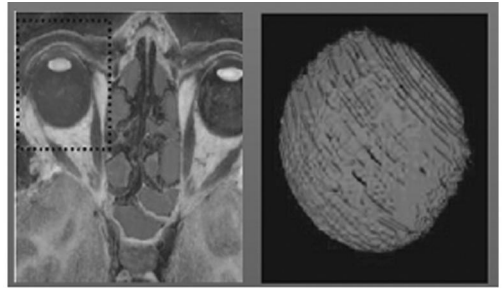


图 9 虚拟人切片图像重建的眼部组织图像^[14]

Fig 9 Reconstructed eye model through slice images in the Virtual Human Project image^[14]

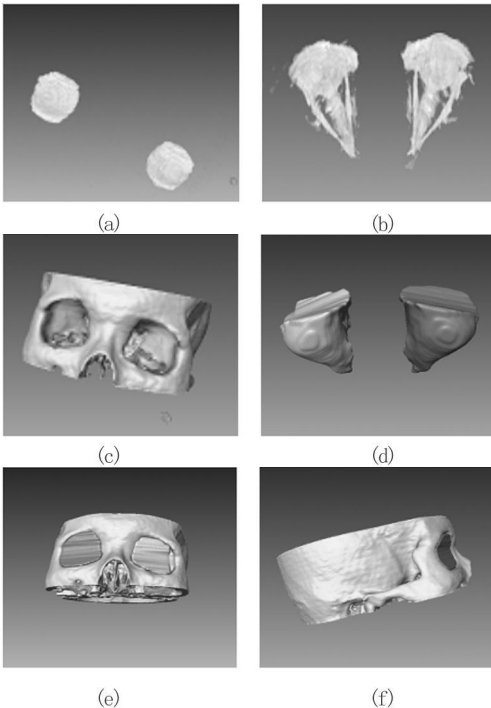


图 8 重建眼部组织

(a) 为体绘制重建的眼球组织; (b) 体绘制重建出眼球周围组织; (c) 表面重建出眼眶组织; (d) 表面重建的眼眶容积; (e) 表面重建的眼眶骨与眼眶容积一起显示的正视图; (f) 表面重建的眼眶骨与眼眶容积一起显示的侧视图

Fig 8 Reconstruction of human eye tissues

陈哲等^[15]利用 CT 图像测量了不同年龄人群眼眶容积, 指出眼眶容积随年龄增长而增长。所采用测量眼眶容积方法为利用测量软件包中的 measure 软件, 选择眼眶前界刚好封闭为完整骨环的图像作为测量起始层面, 用手工描画法将鼠标沿骨性眼眶与眼眶软组织交界处画出封闭图形, 逐层描画获得。与本文方法相比, 操作复杂、费时、费力。

如上所述, Hans^[8]等使用的测量眼眶容积的方法采用重建眼眶组织后的孔洞填补需要手工进行, 也需要花费大量精力与时间, 见图 10。

可见, 本文所使用方法与以上重建眼组织模型

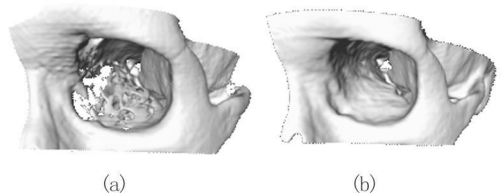


图 10 孔洞填补方法获得眼眶壁模型^[8]

(a) 重建的眼眶骨; (b) 填补了眼眶壁孔洞的结果

Fig 10 Orbital wall model obtained by hole filling method^[8]

相比具有建模速度比较快, 建模比较精确的特点。

5 结束语

本文重建了眼球、眼周围软组织、眼眶骨组织, 测量了眼眶容积。临床上获取的眼部 CT 图像, 利用该方法可以较快地建立眼部各组织的模型, 计算眼眶容积。所建立的眼组织三维模型对眼部疾病的诊断与治疗提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 李桂林, 郑建忠, 潘爱珍. 眼外伤性病变的影像学诊断[J]. 广东医学院学报, 2002, 20(3): 198-199.
- [2] 张明, 鱼博浪, 王泽忠, 等. 正常国人眼外肌的 CT 研究[J]. 中华放射学杂志, 1999, 33(11): 772-774.
- [3] 薛新生, 应援宁, 杨连海, 等. 眼眶容积的 CT 研究[J]. 放射学实践, 2002, 17(1): 35-37.
- [4] Raskin EM, Millman AL, Lubkin V, et al. Prediction of late enophthalmos by volumetric analysis of orbital fractures[J]. Ophthal Plast Reconstr Surg, 1998, 14: 19-26.
- [5] Bondiau P Y and Malandain G. Eye reconstruction and CT- retinography fusion for proton treatment planning of ocular diseases[A]. In: Lecture

- Notes in Computer Science[C]. 1997, 705-714.
- [6] 薛新生, 应援宁, 杨连海等. 眼眶容积的 CT 研究[J]. 放射学实践, 2002, 17(1): 35-37.
- [7] 朱昀, 杨杰, 于志强. 基于混合水平集模型的 CT 颅面眼眶分割[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(5): 875-879.
- [8] Lamecker H, Kamer L, Wittmers A, et al. A method for the three-dimensional statistical shape analysis of the bony orbit[A]. Proceeding Computer Aided Surgery Around the Head[C]. 2007, 94-97.
- [9] Malladi R, Sethian J A, Vemuri B. Shape modeling with front propagation: a level set approach[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(2): 158-174.
- [10] Osher S J and Fedkiw R P. Level set methods and dynamic implicit surfaces[M]. Springer Verlag, 2002.
- [11] 张智勇, 张益, 安金刚. 眼眶容积的计算机软件辅助三维 CT 测量[J]. 中华整形外科杂志, 2006, 22(5): 328-330.
- [12] 戴培山, 王博亮, 鞠颖, 等. 裂隙灯显微图像角膜的快速、自动三维重建[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1049-1052.
- [13] 葛坚. 眼科学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [14] Ackeman M J. The visible human project[A]. Proceedings of the IEEE [C]. 1998, 86(3): 504-511.
- [15] 陈哲, 郑晓华, 谢宝君, 等. 不同年龄正常眼眶容积的 CT 测量[J]. 中华眼科杂志, 2006, 42(3): 222-225.

(收稿日期: 2010-03-16)

《生物医学工程研究》简介

1982 年创刊 季刊

《生物医学工程研究》是山东省科协主管、山东生物医学工程学会等主办的学术性期刊。国内统一刊号: CN37-1413/R, 国际标准刊号 ISSN 1672-6278。

本刊设有论著、科研简报、综述、临床研究及应用等栏目。主要刊登生物医学工程研究领域的最新科技成果, 突出科学性和创新性。读者对象主要为临床医生、大专院校师生及相关人员。

本刊以发表周期短为特色。

本刊为:

- ★中国科技核心期刊
- ★万方数据资源系统收录期刊
- ★中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网入编期刊
- ★中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
- ★中文科技期刊数据收录期刊

国内统一刊号: CN37-1413/R 国际标准刊号 ISSN 1672-6278

主办单位: 山东生物医学工程学会

编辑出版: 《生物医学工程研究》编辑部

联系地址: 山东省济南市解放路 11 号 邮政编码: 250013

《生物医学工程研究》编辑部 收

电话: (0531) 88933885 88562189

传真: (0531) 88933885 Email: scbme@163.com

欢迎投稿!