



基于双 Snake 模型的颅骨 CT 图像分割方法及应用

侯志鹏, 胡晓彤

(天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

摘要: 利用活体人颅骨 CT 图像,通过双 snake 模型边界分割算法确定 CT 图像中颅骨的内外边界,并利用多边形近似其边界,随后通过计算内外多边形中相对应的线段间的距离,实现前额骨、顶骨和枕骨在图像中的厚度信息的获取,从而为基于 CT 图像获取颅骨的厚度信息的应用提供了一种有效手段.在对前额骨、顶骨和枕骨的不同位置的厚度计算结果进行分析后,得出顶骨厚度的标准偏差和厚度变化率较大这一特征规律.本算法对颅骨边界的描述准确,该方法将为建立人体头颅数据库、头部的生物力学造型等领域的研究提供参考依据.

关键词: 活体人颅骨; CT 图像; snake 模型

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2011)02-0070-05

A Method of Skull CT Image Segmentation Based on Double-Snake Model and Its Application

HOU Zhi-peng, HU Xiao-tong

(College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A method which using double-snake model segmentation algorithm to determine internal and external borders of the skull in the CT images was proposed, using polygon to approach its borders, then by calculating the distance between the line segments of inner and outer polygons to get the data of the thickness of pre-frontal, parietal and occipital bones in image. So it can provide a good method to the application of getting thickness information of skull base on CT image. Following an analysis of the thickness data of pre-frontal, parietal and occipital bones at different positions, the standard deviation and the rate of change of the thickness of parietal and occipital bones were proved to be larger. The proposed method can describe the boundary of the skull accurately, this method will provide a basis to establish a database of human heads and research the biomechanics modeling of head and so on.

Keywords: living human skull; CT image; snake model

颅骨几何特征测量是人体测量领域内的一个重要组成部分,在解剖学、临床医学、法医鉴定和头部损伤分析等众多领域都有着广泛的应用价值.传统的颅骨几何特征测量方法,比如,直接使用测量工具对标本测量,应用投影栅相位法对头骨面部特征测量^[1],使用超声波技术对颅骨厚度测量等^[2-3],都是在尸体标本上进行,无法用于活体数据的测量.

随着以 CT 等为代表的现代影像学技术的发展,使得对大量活体人颅骨几何特征的测量得以实现.最初,童春民等^[4]和 Hertel 等^[5]使用 CT 机本身自带的

测量软件对枕骨进行了测量,但是,由于这种方法采用人工选择测量点,因此测量的随机误差相对较大.后来,有些研究采用二值化法进行颅骨边界的提取,其结果精度受阈值选取的准确性影响较大.近年来,应用 snake 模型^[6]于医学图像特征提取的研究逐渐受到关注,因为 snake 模型比起一般的图像处理方法更适用于医学图像的图像分割,获得的分割结果也相对精确^[7].但是基于 snake 模型提取颅骨内外边界,并用提取结果获取头骨厚度信息的研究较少.

本文将原始 snake 模型进行相应改进,使用该模

型对 CT 图像中颅骨的内外边界进行准确定位,并利用获得的内外边界相对应的控制点连线段间的距离来获取颅骨厚度数据,其边界的提取及测量的准确性得到了提高,最后对通过使用该方法得到的前额骨、顶骨和枕骨的不同位置的结果进行分析后得出顶骨和枕骨厚度的标准偏差和厚度变化率较大这一特征。

1 Snake 模型

Snake 模型又称之为主动轮廓线模型 (active contour model),此模型是一条可变形的参数曲线及其相应的能量函数,它以最小化能量为目标,内力约束它的形状,外力引导它的行为,从而控制参数曲线变形,可以在整个图像范围内被吸引着向真实轮廓移动,最后得到具有最小能量的闭合目标轮廓。本文采用基于贪婪算法的 snake 模型,并在此模型的基础上改进 snake 模型的内部能量和外部能量,以便可以通过初始化两组 snake 控制点,使它们分别内缩和外扩,从而找出头骨的内外轮廓。公式为

$$E(v_i) = \min_{0 \leq j \leq 8} \left[\frac{\alpha E_{\text{ela}}(v_{i,j}) + \beta E_{\text{rig}}(v_{i,j})}{2} + \theta E_{\text{ext}}(v_{i,j}) \right]$$

式中: v_i 为 snake 上的控制点,简称为“蛇点”,若 N 为控制点总数,则 $0 \leq i \leq N-1$; $v_{i,j}$ 为蛇点 v_i 及其 8 邻域的点; $E_{\text{ela}}(v_{i,j})$, $E_{\text{rig}}(v_{i,j})$, $E_{\text{ext}}(v_{i,j})$ 分别对应蛇点的弹性能量、刚性能量和外部能量; α , β , θ 分别为各项的系数,而外部能量 E_{ext} 为图像能量 E_{image} 和约束能量 E_{con} 统一。当蛇点远离目标轮廓时, E_{con} 作用于蛇点,将其拉向目标轮廓附近;当蛇点接近目标轮廓时, E_{con} 停止作用,转而由 E_{image} 将蛇点准确引导至目标轮廓。这样做的优点在于,算法受初始轮廓位置的影响较小,在蛇点距离真实轮廓较远时,可以较少的受到 CT 图像噪声的影响,而当靠近真实轮廓时,又可较少受到约束力影响,从而更准确的找到真实轮廓。各个能量的计算公式如下:

$$E_{\text{ela}}(v_{i,j}) = \frac{|\bar{d} - |v_{i,j} - v_{i-1}||}{\min_{0 \leq j \leq 8} |\bar{d} - |v_{i,j} - v_{i-1}||}$$

式中, \bar{d} 为蛇点间的平均距离, $\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |v_{i,j} - v_{i-1}|$ 。

$$E_{\text{rig}}(v_{i,j}) = \frac{|v_{i-1} - 2v_{i,j} - v_{i+1}|^2}{\min_{0 \leq j \leq 8} |v_{i-1} - 2v_{i,j} - v_{i+1}|^2}$$

灰度图像目标区与背景区有一定的灰度过渡。设图像中目标区比背景区暗(目标区平均灰度低于背景区),全图像的灰度均值为 g_{av} ,方差为 std ,蛇点 8 邻域的平均灰度值为 g_{av_8} 。当 $g_{\text{av}_8} < g_{\text{av}} + \omega \times std$ 时,认为控制点远离目标真实轮廓,这时

$$E_{\text{ext}}(v_{i,j}) = E_{\text{con}}(v_{i,j})$$

设 $C = (\bar{x}, \bar{y})$ 为蛇点组成的动态轮廓的中心,为各个蛇点坐标的平均值。如果把轮廓初始化在目标真实轮廓内部,蛇点到轮廓中心的距离 $d_c = |v_i - C|$,蛇点的邻域点到轮廓中心距离 $d_n = |v_{i,j} - C|$,则约束力为

$$E_{\text{con}}(v_{i,j}) = \rho \frac{d_c(v_i)}{d_n(v_{i,j})}$$

式中, ρ 为参数。可以看出,此约束力会使各个蛇点远离动态轮廓的中心,朝向目标的实际轮廓移动。当 $g_{\text{av}_8} \geq g_{\text{av}} + \omega \times std$ 时,认为控制点靠近目标真实轮廓,这时

$$E_{\text{ext}}(v_{i,j}) = E_{\text{image}}(v_{i,j})$$

$$E_{\text{image}}(v_{i,j}) = -|I(v_{i,j})|$$

式中, $|I(v_{i,j})|$ 表示蛇点的梯度。 E_{image} 使蛇点向梯度变化最大的方向移动,从而找到目标边界。

2 基于双 snake 模型算法的头骨特征计算

2.1 外扩型 snake 模型与内缩型 snake 模型

在医院拍摄的活体颅脑 CT 扫描图像中选取无颅骨断裂史、无肿瘤史、具有“正常”颅脑几何尺寸的样本。借助 CDViewer 软件选取初见脑室的一层 CT 图像,根据骨组织的 CT 显示范围,调整窗宽、窗位为 2000 和 600,以使骨骼显示最为清晰。为了方便对图像的操作并保证图像质量,将原 DICOM 格式的 CT 图像导出,并同比例转化为 BMP 格式,如图 1 所示。



图 1 原始颅骨图像

Fig.1 Original image of skull

为了准确得到头骨各部分的厚度,需要首先确定CT图像中颅骨的内外轮廓,而传统的 snake 算法只能确定图像中某一边界.为此,本文提出一种同时使用内缩和扩张 snake 模型,分别确定颅骨内外轮廓的双 snake 模型算法.传统的 snake 模型都是将轮廓初始化在目标的内部,并扩张找到边界,而且 snake 模型中的约束力 E_{con} 可以控制蛇点总体的运动方向.可以通过修改 E_{con} 的表达式,得到内缩型 snake 模型的约束力 $E_{con_in}(v_{i,j})$ 以及扩张型 snake 模型的约束力 $E_{con_out}(v_{i,j})$.

$$E_{con_in}(v_{i,j}) = \rho \frac{d_c(v_i)}{d_n(v_{i,j})}$$

$$E_{con_out}(v_{i,j}) = -(\rho \frac{d_c(v_i)}{d_n(v_{i,j})})$$

上述内缩型及外扩型 snake 模型的结合就形成了本文提出的双 snake 模型.

2.2 设定蛇点的初始位置

snake 控制点初始位置的确定对于轮廓提取的准确性非常重要.采用以 CT 图像中头颅所在区域的中心为 snake 初始圆的中心,并基于头颅最大径向设计内外圆初始半径的方法.

首先将图去所示原始图像进行二值化处理,得到图 2 所示的二值图像,图中白色区域所示的头颅区域.

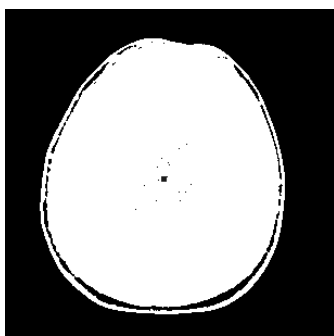


图 2 二值颅骨图像
Fig.2 Binary image of skull

根据二值化后的图像确定脑部区域的中心,并将其作为初始化 snake 内外两圈控制点的圆心.设整个脑部区域的纵向最大长度的二分之一为 d ,选择 $d-30$ 像素作为内圈控制点的半径,取 $d+30$ 像素作为外圈控制点的半径.这样就可以保证内外两圈的控制点位于头骨内外两侧的合适的地方.图 3 所示为初始化后双 snake 模型控制点集合,内外圈的控制点分别用于确定内边界和外边界.

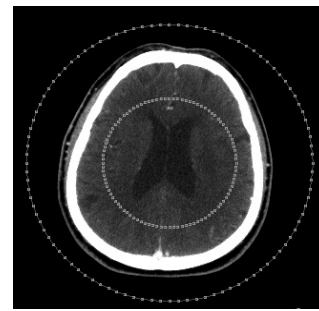


图 3 蛇点的初始轮廓
Fig.3 Initial location of snake point

双 snake 模型的内外控制点从两个方向向头骨边界逼近,在找到边界之后,snake 算法停止,最后得到的两个封闭的多边形.图 4 是 snake 算法最后确定的边界.双 snake 模型在不破坏原图的情况下,将各个控制点准确的附着在头骨边界上,并且各个控制点之间的连线也与头骨的边界紧密贴合.这说明由该算法得到的内外两个由线段组成的闭合的多边形可以准确地描述原图的头骨边界.

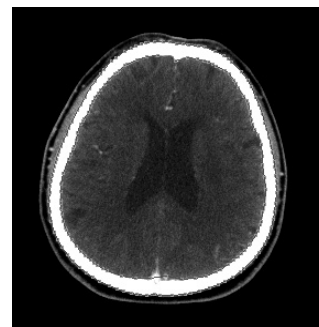


图 4 Snake 模型检测出的边界
Fig.4 Contour by using snake model

2.3 基于多边形的头骨特征

根据头部 CT 图像可以得到的头部特征包括:前额骨、顶骨以及枕骨的厚度、头的最宽和最长距离.

2.3.1 头骨中心轴的确定

由于在做 CT 扫描时并不能够保证被扫描者的头不偏斜,为了准确地找出各个骨骼所在图像中的区域,需要找出头骨的中轴线.根据头骨的形状特征,特别是在头骨左右的前额骨附近的骨骼边界可以近似为抛物线这一特点,采用文献[8]中的方法确定颅骨中轴线.

如图 5 所示,在确定了头骨的近似抛物线对称轴的斜率后,将通过头骨区域中心、斜率为该对称轴斜率的直线作为头骨的中轴.根据头部解剖学的知识和头部偏斜程度,就可以确定图像中前额骨,顶骨,枕骨分别所在的区域.在确定各个区域后,就可以利用

双 snake 模型得到的内外多边形来确定各个部分的厚度.

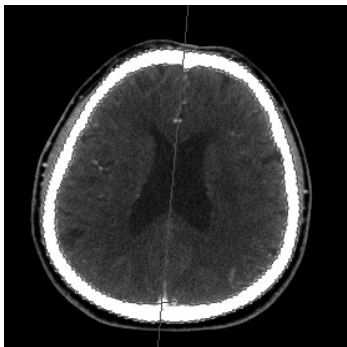


图5 头骨区域的中心轴线
Fig.5 Axis of the skull area

2.3.2 计算头骨各部分厚度

通过 CT 图像可以清楚地看出头骨的厚度并不是均匀的,并且有些部分存在较大的厚度差异.而基于本文提出的双 snake 模型确定头骨内外边界是由两个闭合多边形组成,从而可以进行头骨厚度的多点测量.

为了防止误测量,本文采用找出具有重合区域的内外轮廓中相对应的两条线段的方法,来确定厚度计算的准确区域.图6为提取的轮廓中某部位的细节示意图,其中 A' 为 A 在 ab 上的投影点并落在 ab 范围内, b' 为 b 在 AB 上的投影点并落在 AB 范围内.则图中的四边形区域 $AA'bb'$ 即为这两条线段的重合区域.

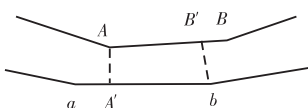


图6 厚度测量区域的示意图

Fig.6 Sketch of the thickness measuring area

使用 snake 模型提取边界,snake 控制点恰好准确落在边界上,通过控制点测量厚度,结果更准确.在得到含有重合区域的两条线段之后,计算厚度就转变为计算区域中 snake 控制点处的厚度,即蛇点与其在对边上的投影点间的距离.如图6所示, AA' 和 bb' 的长度即为这段区域的厚度.整个轮廓由多个线段组成,组成多个测量区域,均可按照上方法来测量.

3 分析头部各个部分骨骼的厚度

通过以上方法获得了前额骨、顶骨、枕骨的一组

以像素为单位的厚度信息,根据获得的结果,前额骨、顶骨、枕骨的厚度并非均匀,这一点与视觉观察结果相符.

另外,通过计算厚度平均值 X_{av} 和标准偏差 σ 来衡量厚度变化的程度.描述厚度变化情况的厚度变化系数 V 的公式如下:

$$V = \sigma / X_{av} \times 100\%$$

其中:

$$X_{av} = (\sum x_i) / n$$

$$\sigma = \sqrt{\sum (x_i - X_{av})^2 / n - 1}$$

式中, n 为数据的数量.计算结果如表1所示.可以看出,顶骨厚度的标准偏差和厚度变化率较大.

表1 三种骨骼的厚度变化系数

Tab.1 Variety coefficient of thickness about the three bones

骨骼	n	X_{av} /像素	σ	$V/\%$
前额骨	36	13.470 3	1.392 3	10.34
顶骨	28	15.044 1	1.793 0	11.92
枕骨	78	11.239 1	0.770 1	6.85

4 结 语

本文提出了一种同时使用内缩和外扩的 snake 模型提取 CT 图像中颅骨内外轮廓,并基于该颅骨内外轮廓信息在图像中测量颅骨厚度的方法.由于该方法利用两个多边形描述颅骨内外轮廓,解决了边界点间距离测量可能因边界点连线与边界不垂直而带来误差的问题.

同时,由于本方法可简便、准确地获得较多位置的头骨厚度信息,使得对头骨厚度信息分析成为可能.利用本方法获得的大量活体颅骨厚度信息能够为活体颅骨几何特征的研究提供参考依据.

本文得到的厚度信息是以 CT 图像中的像素为单位的,在获得像素与实际大小之间的比例之后,就可以转化为实际厚度,这也是本文下一步将要进行的工作.

参考文献:

- [1] 周文莲,吴新智. 现代人头骨面部某些特征的投影栅相位法测量研究[J]. 人类学学报,2001,20(2):81-92.
- [2] Ruan Jesse, Prasad P. The effects of skull thickness variations on human head dynamic impact responses[J]. Stapp Car Crash Journal,2001,45:395-414.
- [3] Hakim S, Watkin K L, Elahi M M. Measurement of cranial bone thickness using A-mode ultrasound [C]// Pro-

- ceedings of the 1997 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway:IEEE,1997:613-616.
- [4] 童春民,吴景凯,龚遂良,等. 成人颅骨枕骨厚度 CT 测量[J]. 浙江临床医学,2003,5(3):168-169.
- [5] Hertel G,Hirschfelder H. In vivo and in vitro CT analysis of the occipita[J]. European Spine Journal,1999(8):27-33.
- [6] Kass M,Witkin A,Terzo poulos D. Snakes:active contour models[C]//Proceeding of 1st International Conference of Computer Vision. Boston:Kluwer Academic Publishers,1987:259-268.
- [7] 苑玮琦,马军防,狄文彬,等. 基于主动轮廓线的虹膜内边界的定位方法[J]. 红外与激光工程,2003,32(6):606-609.
- [8] 李海岩,阮世捷,彭翔,等. 基于 CT 图像的活体人颅骨几何特征的研究[J]. 中国生物医学工程学报,2007,26(6):947-950.

(上接第 36 页)

(2) 添加适量的扩链剂后, P(3HB-co-4HB) 样品的断面由较光滑变为较粗糙, 呈现典型的韧性断裂特征. 表明扩链剂的加入, 使 P(3HB-co-4HB) 发生了脆韧转变.

参考文献:

- [1] Chen G Q,Wu Q. The application of polyhydroxyalkanoates as tissue engineering materials[J]. Biomaterials, 2005,26(33):6565-6578.
- [2] Cheng G X,Cai Z J,Wan L. Biocompatibility and biodegradation of poly(hydroxybutyrate)/poly(ethylene glycol) blend films[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine,2003,14(12):1073-1078.
- [3] Tobella L M,Bunster M,Pooley A,et al. Biosynthesis of poly- β -hydroxyalkanoates by *Sphingopyxis chilensis* S37 and *Wautersia* sp. PZK cultured in cellulose pulp mill effluents containing 2,4,6-trichlorophenol[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology,2005,32(9):397-401.
- [4] Thakor N,Trivedi U,Patel K C. Biosynthesis of medium chain length poly(3-hydroxyalkanoates) (mcl-PHAs) by *Comamonas testosteroni* during cultivation on vegetable oils[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(17):1843-1850.
- [5] Janigová I,Lacík I,Chodák I. Thermal degradation of plasticized poly(3-hydroxybutyrate) investigated by DSC [J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 77(1):35-41.
- [6] 金日光,华幼卿. 高分子物理[M]. 北京:化学工业出版社,2000:208-211.
- [7] Kunioka M,Tamaki A,Doi Y. Crystalline and thermal properties of bacterial copolyesters:poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) [J]. Macromolecules, 1989, 22(2):694-697.
- [8] Lehrle R S,Williams R J. Thermal degradation of bacterial poly(hydroxybutyric acid):mechanisms from the dependence of pyrolysis yields on sample thickness[J]. Macromolecules,1994,27(14):3782-3789.
- [9] Kunioka M,Doi Y. Thermal degradation of microbial copolyesters: poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) [J]. Macromolecules,1990,23(7):1933-1936.
- [10] 方禹声,朱吕民. 聚氨酯泡沫塑料[M]. 北京:化学工业出版社,1996.
- [11] Woo S I,Kim B O,Jun H S,et al. Polymerization of aqueous lactic acid to prepare high molecular weight poly(lactic acid) by chain-extending with hexamethylene diisocyanate[J]. Polymer Bulletin, 1995, 35(4):415-421.
- [12] 王勋林,孙文佳,杜宏伟. 环氧树脂对 PET 扩链的研究[J]. 塑料工业,2009,37(12):19-21.