

牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法*

梁英蓬¹, 唐平¹, 陈松龄², 江小平³, 李芳¹, 夏迁¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006; 2. 中山大学附属第一医院 口腔科, 广州 510120; 3. 广东工业大学 医院, 广州 510006)

摘要: 为了有效地从 CT 图像中分割下颌神经管, 提出了牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法。该算法在分析目前下颌神经管分割算法存在的问题, 利用多水平集主次统计模型设计反馈控制, 并基于局部牙弓曲线约束分析方法提出。实验表明算法能有效提高下颌神经管分割的收敛速度与精度。

关键词: 牙弓曲线; 多水平集算法; 主次统计模型; 下颌神经管

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)04-1239-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.068

Levelset algorithm of dental arch curve constraint of multi level set and primary and secondary statistical model

LIANG Ying-peng¹, TANG Ping¹, CHEN Song-ling², JIANG Xiao-ping³, LI Fang¹, XIA Qian¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Dept. of Stomatology, The First Affiliated Hospital, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510120, China; 3. The Hospital of Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To effectively from of mandibular neural tube, this paper proposed the segmentation of CT images of dental arch curve constraint multi level set and primary and secondary statistical model, the algorithm was based on the analysis of current problems of mandibular neural tube segmentation algorithm, using the multi level set and primary and secondary statistical model design of feedback control, and proposed constraints analysis method based on local dental arch curve. Experiments show that algorithm can effectively improve the convergence speed and precision of the mandibular neural tube division.

Key words: dental arch curve; multi level set algorithm; primary and secondary statistical model; mandibular neural tube

0 引言

如何确保邻近重要生理组织结构的安全,最大限度地利用骨量,将种植体植入理想的位置是临床口腔医学领域的一大难题^[1]。若植入不当,会引起骨板侧壁穿孔和下牙槽神经损伤,造成患者下唇麻木甚至丧失感觉。因此术前分析下颌管的解剖结构具有举足轻重的意义。下颌神经管是下颌骨内主要的下牙槽神经通道,其 CT 灰度值与周围组织非常相似,且常与相邻区域粘连,其结构形状不易被界定,因而其识别也成为了口腔界一直关注的问题,并影响着牙种植技术的发展^[2,3]。例如,卜令学等人^[4]通过总结测量成人解剖下颌骨样本确定下颌神经管的位置;刘发权等人^[5]通过观察 CT 断层图像下颌神经的特征,获得下颌管在下颌骨中的位置。但其均属于经验性总结,对口腔种植智能化指导意义有限。国外,比利时 Materialise 公司的 Simplant3D 牙种植系统,允许医生在 CT 三维重建模型的基础上,根据下颌管端口的位置和解剖结构能手动大体地标记下颌管在下颌骨中的组织结构和走向趋势,对临床医生

的手术经验要求较高^[2]。为了进一步实现自动化分割下颌神经管,Kondo 等人^[6]通过在全景图上体像素 3D 梯度方向的不连续性,提出一种牙颌神经管提取方法;Yau 等人^[7]提出了自适应区域增长的算法分割下颌神经管,但其对种子选择非常敏感,对较模糊图像其自适应增长难以控制,且无法综合利用目标的整体信息,以致分割区域边界不连续。为了解决在相对周围组织图像对比度较低的下颌神经管的分割问题,杨玲等人^[2]提出局部信息约束的形状导向水平集算法模型,起到了很好的效果。但是由于模型单一速度函数水平集,抗噪性不强,且对含有伪影、对比度不高、弱边界的 MRI 图像难以处理边界缺口问题,分割结果不理想。虽然通过增加局部信息约束改进的形状导向水平集的能量泛函数模型,一定程度上有效提高下颌管分割的精度,但其算法收敛的速度与精度依然有改进的空间。针对以上情况,本研究基于 Levelset 的下牙槽神经管分割方法,引入多函数多水平集算法,利用主次多层次概率模型改进先验知识 Mumford-Shah 能量约束函数模型,并充分利用下颌神经管的牙弓曲线和边缘梯度信息等局部信息约束水平集演化,使其得到更快更精确的牙颌神经管分割结果。

收稿日期: 2013-05-29; 修回日期: 2013-08-02

基金项目: 广州市科技计划项目(2012J4100066)

作者简介: 梁英蓬(1988-),男,广东江门人,硕士研究生,主要研究方向为智能进化算法、医学图像可视化(470677366@qq.com);唐平(1958-),女,湖南人,教授,博士,主要研究方向为智能算法、计算机图形图像处理;陈松龄(1963-),男,海南人,教授,博士,主要研究方向为口腔颌面外科与口腔种植学;江小平(1966-),男,湖北人,讲师,硕士研究生;李芳(1988-),女,湖北人,硕士研究生,主要研究方向为智能进化算法;夏迁(1990-),男,湖北人,硕士研究生,主要研究方向为医学图像可视化。

1 牙弓曲线约束的多水平集主统计模型的 Level-set 算法

1.1 多水平集分割模型

基于几何变形模型的形状导向水平集分割方法存在两个较大的缺点^[8]: a) 由于下颌神经管边界强度差异很大, 传统速度函数 F 的边界控制参数定义困难, 需人工繁琐地选择适当参数, 否则可能离实际边界还有一段距离时算法就停止搜索; b) 速度函数缺少必要的反馈信息, 在边界较弱处容易穿越, 穿越的轮廓一直向前扩展无法调整, 从而导致目标分割错误。

针对上述几何变形模型的形状导向水平集方法的缺点, 本文在多个分割区域根据不同的特征属性建立不同的水平集函数, 利用每个水平集函数区域相似性和边界强度定义其速度函数。这样就能通过多个水平速度函数相互协调轮廓的扩展演化方向和速度, 降低弱边界穿越的可能性, 且控制参数选取更容易。多个水平集函数的定义为

$$\phi_i(X, t) = \begin{cases} > 0, X \in \omega_i & X \notin \Gamma_i \\ < 0, X \notin \omega_i, \text{对应的速度函数 } F_i & \end{cases} \quad (1)$$

$$\phi_n(X, t) = \begin{cases} = 0, X \in \Gamma_1 \dots \\ > 0, X \in \omega_n & X \notin \Gamma_n \\ < 0, X \notin \omega_n, \text{对应的速度函数 } F_n \\ = 0, X \in \Gamma_n & \end{cases}$$

其中: $\omega_i (i = 1, \dots, n)$ 为 Γ_i 包围区域, Γ_i 为第 i 个水平集的零水平集。

本文根据内部边界强度阈值 v 和区域差异容忍度 u 定义不同的速度函数。 v 是分割对象内部边界的平均强度值, u 是指分割对象内部允许区域差异性大小。下面给出具体定义:

$$u = \text{var}(\rho_\omega), v = \frac{\sum \nabla(\rho_\omega) > \varepsilon \nabla(\rho_\omega)}{\text{num}(\nabla(\rho_\omega) > \varepsilon)} \quad (2)$$

其中: u, v 分别为区域 ω 内像素值的方差和临界值梯度平均值; ∇ 为梯度算子; $\text{num}(\nabla(\rho_\omega) > \varepsilon)$ 为满足条件的个数。

根据 u, v 这两个特性参数设定速度函数 F , 设区域相似度为 R, T 的曲率为 K , 边界强度为 B , 则速度函数具体定义为

$$F = (R, K, B, u, v) \quad (3)$$

根据 Malladi 等人^[9]采用的曲率 K 函数的做法, 则现在速度函数为

$$F = f_1(u) f_2(v) e^{R} e^{-B} (F_0 + F(K)) \quad (4)$$

$$K = \text{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) = \frac{\phi_{xx} \phi_y^2 - 2\phi_x \phi_y \phi_{xy} + \phi_{yy} \phi_x^2}{(\phi_x^2 + \phi_y^2)^{3/2}} \quad (5)$$

1.2 主统计模型

由于 CT 或 MRI 医学图像, 含有复杂的人体组织信息, 分割目标形状复杂多变, 尤其当图像中含有大量噪声、成像质量不高时, 仅依靠阈值信息不能有效地分割出感兴趣的区域。附加形状先验知识作为贪心算法约束条件, 可使分割向可能最优的形状进行。但是对于全局 512×512 CT 像素的图像, 其贪心算法的协方差矩阵计算量非常大, 要得到它的精确概率模型非常困难^[10,11]。因此本文利用主次多层概率统计模型, 根据不同图像序列分辨率, 建立不同主次尺度的概率统计模型。首先通过主层先验知识概率统计模型分割大体形状, 再用局部次分辨率概率函数借助多水平集算法继续精细优化分割。经实验表明, 这种主次概率模型避免了传统概率模型全局迭代计算复杂的问题, 提高了分割速度, 且其分割形状准确度也有明显改善。

先验知识的引入建立在著名 Mumford-Shah 能量函数上, 只考虑曲线内外灰度特征限制, 则它可表示为^[9]

$$E_{MS}(C, \mu_0, \mu_1) = \frac{1}{2} \alpha \int_{\Omega_1} (f - \mu_1)^2 dx + \frac{1}{2} \beta \int_{\Omega_0} (f - \mu_0)^2 dx + \gamma L(C) \quad (6)$$

其中: C 为闭合曲线; f 为图像; μ_0, μ_1 是目标内外平均灰度值; Ω_0, Ω_1 为曲线内外区域; $L(C)$ 为曲线长度。

附加上先验知识的能量约束函数如下:

$$E_{MS}(C, \mu_0, \mu_1) = E_{MS}(C, \mu_0, \mu_1) + \alpha E_{\text{shape}}(C) \quad (7)$$

其中:

$$E_{\text{shape}} = \alpha \int D^2(S * (x, y) * R + T) dx dy \quad (8)$$

S, R, T 分别表示缩放、旋转、平移。

设符号形状的距离函数在尺度 J 的数学期望为 $S_j(x, y)$, 方差为 $\sigma_{s_j(x, y)}$, 符号函数服从高斯分布, 则每点的 $\Phi(x, y)$ 的概率密度为

$$P(\Phi(x, y)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{s_j(x, y)}} e^{-\frac{(\Phi(x, y) - S_H(x, y))^2}{2(\sigma_{s_j(x, y)})^2}} \quad (9)$$

对应尺度概率形状能量函数为

$$E_{\text{shape}} = \iint P(\Phi(x, y)) dx dy \quad (10)$$

根据 Mumford-Shah 能量最小的约束条件, 则概率模型满足以下等式:

$$E_{MS}(C, \mu_0, \mu_1) = E_{MS}(C, \mu_0, \mu_1) + \alpha E_{\text{shape}}(C) \quad (11)$$

$$E(\phi) = \frac{1}{2} \alpha \iint_{\Omega_1} H(\phi) (f - \mu_1)^2 dx dy + \frac{1}{2} \beta \iint_{\Omega_0} (1 - H(\phi)) (f - \mu_0)^2 dx dy + \gamma \iint_{\Omega} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{s_j(x, y)}} e^{-\frac{(\Phi(x, y) - S_H(x, y))^2}{2(\sigma_{s_j(x, y)})^2}} dx dy \quad (12)$$

至此, 建立了一个全局到局部主次多层次的分割能量模型。首先依据全局主概率能量函数模型进行分割, 能快速确定目标粗略位置。在确定主体目标的基本位置后, 利用局部次概率能量函数模型进行较细的统计形状先验知识模型检测, 优化分割目标。将多尺度的先验知识加入到多水平集的演化, 从而使目标区域分割在主次多概率能量函数模型指导下进行。实验表明, 这种方法比单一全局迭代得到更好分割效果, 对噪声和缺损图像有良好的适应能力。下一步将图像局部细牙弓曲线作为形状导向多水平集约束条件, 进一步提高下颌神经管分割的精确度和减少 Levelset 算法分割牙颌神经管的时间复杂度。

1.3 牙弓曲线约束的形状导向水平集分割模型

上述模型的能量函数利用了图像区域形状信息、边缘梯度和主次灰度分辨率, 但由于缺少局部区域牙弓曲线拓扑结构限制, 在灰度值强度分布不均的同质区域内, 阈值选取上容易忽略这些局部信息, 特别是对于在分割边界微弱变化的边缘区域。由于能量函数模型的阈值是由整体信息决定, 所以当拓扑闭合时, 容易忽视局部结构细节, 造成分割的结果不尽人意。并且由于下颌神经管相对周围组织对比度低, 且结构偏小, 对初始轮廓要求较高^[2], 所以利用上述的多水平主次要能量模型分割方法还不能达到理想的分割效果。因此本文结合下颌管与下颌牙骨组织的模型特性, 在多水平形状导向主次要能量函数的基础上引入多项式拟合的牙弓曲线分布的局部信息, 使得算法在对比度低、分布不均匀的局部区域仍然有很强的表现能力。图 1 为多项式拟合的牙弓曲线。



图1 下颌管多项式拟合的牙弓曲线
此时目标分割模型的能量函数定义为

$$E_{MS} = E_{MS0} + \alpha E_C(C, f_1(x), f_2(x)) \quad (13)$$

其中: α 是局部曲线信息分量的权重系数。 E_C 的计算方法为

$$E_C(C, f_1(x), f_2(x)) = \varphi_1(\int k(x-y)|I(y) - f_1(x)|^2 dx dy) + \varphi_2(\int k(x-y)|I(y) - f_2(x)|^2 dx dy) \quad (14)$$

Y 是以点 X 为中心领域内所有的灰度点。由高斯核函数区域特性定义可知,当 $|x-y| > 3\delta$ 时,牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法的能量函数值接近于零。也即是说距离目标点 X 较远的 Y 点将不计入概率能量函数模型中,这就强调了牙弓曲线附近灰度和边缘梯度的局部信息,减少离目标区域较远特征点对能量模型参数控制的影响,提高下颌神经管分割质量的同时也加快分割速度。

2 比较与讨论

为了说明牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法的优越性,在此通过以传统的 Levelset 算法分割结果进行对比图。图2为分割结果对比,其中图2(a)~(d)为下颌神经管在下颌骨断面位置,(e)~(h)和(i)~(l)分别为本算法分割结果与传统 Levelset 算法分割的结果。图2(a)~(d)分别为下颌骨断面图;(e)~(h)分别对应(a)~(d)的本算法的局部放大图像;(i)~(l)分别对应(e)~(h)的传统 Levelset 算法分割结果。

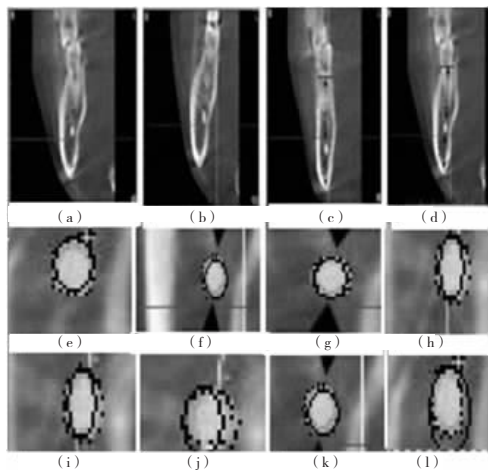


图2 下颌管分割中神经管边缘(虚线)和活动轮廓曲线(实线)

通过图2对比说明,牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法在分割演化过程中比传统 Levelset 算法、活动轮廓更加接近虚线表示的下颌神经管的边缘。牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法有效逼近真实下颌神经管边缘,分割效果明显优越于传统分割算法。

为了进一步对比分割结果,本文利用相对极限测量精度 RUM_A 指标和演化消耗时间指标评价下颌神经管分割情况。

表1是下颌神经管分割对比结果。从表1可看出,传统 Levelset 算法的平均分割精度为 4.76%,演化消耗时间为 110 s,而本算法的平均分割精度为 1.65%,演化消耗时间为 75 s。由此可见,本算法利用多水平集、主次多层概率能量模型和局部牙弓曲线,将区域、边界、局部和形状信息进行整合,大大增强了其分割边缘图像的能力,分割的效果比较理想。

表1 下颌管分割精度和消耗时间对比结果

图像	相对极限测量精度/%				演化模型消耗时间/s				
	(a)	(b)	(c)	(d)	平均精度	(a)	(b)	(c)	(d)
本算法	1.58	1.67	1.64	1.72	1.65	65	78	72	86
传统 Levelset	4.53	4.80	4.32	5.40	4.76	92	119	95	131

3 实验结果

本实验选取一组由中山大学附属第三医院提供的 210 幅 512×512 的 CT 图像序列。图3是在下颌骨侧面重建基础上分割下颌神经管的结果。由分割结果可知,利用牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法对下颌神经管进行分割能更准确地找到目标边界。表2和3是在 MATLAB 仿真基础上对下颌管上下径和颊舌径测量数值进行统计分析,结果表明经牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法分割测量结果与标本对比无显著性差异。但由于 CT 图像成像质量差异,故不同的具体问题可能导致分割结果的差异,因此应根据具体情况,选择合适的算法参数。

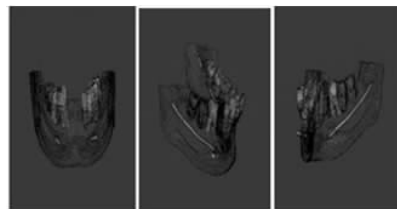


图3 下颌神经管分割模型

表2 下颌神经管上下径数值测量($\bar{X} \pm S, \text{mm}$)

位置	标本	CT 影像
第二前磨牙区	3.04 ± 0.19	3.88 ± 0.09
第一磨牙区	3.14 ± 0.20	3.08 ± 0.23
第二磨牙区	3.32 ± 0.39	3.26 ± 0.43
第三磨牙区	3.78 ± 0.22	3.88 ± 0.40

表3 下颌神经管颊舌径数据测量($\bar{X} \pm S, \text{mm}$)

位置	标本	CT 影像
第二前磨牙区	3.04 ± 0.19	3.02 ± 0.18
第一磨牙区	3.10 ± 0.18	3.74 ± 0.16
第二磨牙区	3.14 ± 0.20	3.17 ± 0.26
第三磨牙区	3.22 ± 0.23	3.26 ± 0.31

4 结束语

本文提出了牙弓曲线约束的多水平集主次统计模型的 Levelset 算法,不仅能够有效地解决单一水平集速度函数定义困难和水平速度函数缺少回馈控制的问题,而且引入主次多层次概率能量模型,能够在有效减少计算量的同时兼顾全局和局部特征信息。最后结合牙弓曲线局部信息,融合区域、边界和边界信息约束多水平集函数,有效提高牙颌 (下转第 1245 页)

三维模型表面特征点的视点选择方法。与其他方法相比,其主要特征如下:a)基于顶点的领域信息计算顶点的局部高度,利用一种对称的高度差计算改善了文献[16]中局部高度计算耗时的缺陷;b)借助于顶点的局部高度,结合非极大值抑制方法提取三维模型表面特征点,由实验结果可知,所检测到的特征点与人类的视觉特征是相符的;c)视点质量的计算主要分为两个步骤:(a)根据视点下可见特征点的数目从众多候选视点中筛选出一个较小的但质量较优的视点集合;(b)这个小的集合中根据顶点的投影分布选择出最佳视点。视点质量计算过程仅仅依赖于所提取的特征点,而不是直接依赖于三维模型的顶点和面片,故视点质量计算效率较高,综合考虑了特征点的数目和几何分布信息,能够更加客观地度量视点质量。

该方法是基于三维模型的特征点的检测进行视点质量评价,将来的研究可以从以下几个方面考虑:三维模型表面显著性几何信息的检测,如三维模型表面特征点、特征线、显著性区域的检测等;综合三维模型表面多种特征信息来进行视点质量度量。

参考文献:

- [1] BLANZ V, TARR M J, BULTHOFF H H, *et al.* What object attributes determine canonical views? [J]. *Perception-London*, 1999, 28(5): 575-600.
- [2] VAZQUEZ P P, FEIXAS M, SBERT M, *et al.* Viewpoint selection using viewpoint entropy [C]//Proc of Vision Mod-Dealing and Visualization Conference. Stuttgart: AKA Gmbh, 2001: 273-280.
- [3] VAZQUEZ P P, FEIXAS M, SBERT M, *et al.* Viewpoint entropy: a new tool for obtaining good views of molecules [C]//Proc of Symposium on Data Visualisation. Aire-la-Vile: The Eurographics Association Press, 2002: 183-188.
- [4] VÁZQUEZ P P. On the selection of good views and its application to computer graphics [D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- [5] SBERT M D, PLEMENOS D, FEIXAS M. Viewpoint quality: measures and applications [C]//Proc of the 1st Eurographics Workshop on Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging. Aire-la-Vile: The Eurographics Association Press, 2005: 185-192.
- [6] PAGE D L, KOSCHAN A F, SUKUMAR S R, *et al.* Shape analysis algorithm based on information theory [C]//Proc of IEEE International Conference on Image Processing. Washington DC: IEEE Press, 2003: 229-232.
- [7] FEIXAS M, SBERT M, GONZÁLEZ F. A unified information theoretic framework for viewpoint selection and mesh saliency [J]. *ACM Trans on Applied Perception*, 2009, 6(1): 1-23.
- [8] LEE C H, VARSHNEY A, JACOBS D W. Mesh saliency [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2005, 24(3): 659-666.
- [9] SOKOLOV D, PLEMENOS D. Viewpoint quality and scene understanding [C]//Proc of the 6th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage. Aire-la-Vile: The Eurographics Association Press, 2005: 67-73.
- [10] DUTAGACI H, CHEUNG P C, GODIL A. A benchmark for best view selection of 3D objects [C]//Proc of ACM Workshop on 3D Object Retrieval. New York: ACM Press, 2010: 45-50.
- [11] YANG Yu-bin, LU T, LIN J J. Saliency regions for 3D mesh abstraction [C]//Proc of the 10th Pacific Rim Conference on Multimedia. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 292-299.
- [12] LEIFMAN G, SHTRUM E, TAL A. Surface regions of interest for viewpoint selection [C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Press, 2012: 414-421.
- [13] 杨利明, 王文成, 吴恩华. 基于视平面上特征计算的视点选择 [J]. *计算机辅助设计与学报*, 2008, 20(9): 1097-1103.
- [14] MEYER M, DESBRUN M, SCHRODER P, *et al.* Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds [J]. *Visualization and MathMatics*, 2002, 3(2): 52-58.
- [15] ZOU Guang-yu, HUA Jing, DONG Ming, *et al.* Surface matching with salient keypoints in geodesic scale space [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2008, 19(3-4): 399-410.
- [16] 林金杰, 朱代辉, 杨育彬. 3维模型局部高度研究 [J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(10): 1841-1849.
- [17] Stanford Computer Graphics Laboratory. The stanford 3D scanning repository [EB/OL]. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>.
- [18] Watertight track of SHREC 2007 [EB/OL]. <http://watertight.gemati.cnr.it/>.

(上接第1241页)神经管分割的准确性。实验结果表明,所提出牙弓曲线约束的多水平集主成分统计模型的 Levelset 算法有效地解决了复杂的牙颌神经管分割的问题,为口腔临床下颌神经管分割提供了有效的新方法。

参考文献:

- [1] POGREL M A. Damage to the inferior alveolar nerve as the result of root canal therapy [J]. *The Journal of the American Dental Association*, 2007, 138(1): 65-69.
- [2] 杨玲, 侯小叶, 王中科, 等. 局部信息约束的形状导向水平集算法对下颌管的分割 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2012, 31(2): 161-166.
- [3] KIM G, LEE J, LEE H, *et al.* Automatic extraction of inferior alveolar nerve canal using feature-enhancing panoramic volume rendering [J]. *IEEE Trans on Technol Biomed*, 2011, 58(2): 253-264.
- [4] 卜令学, 王科, 陈欣, 等. 下颌神经管的解剖结构 (英文) [J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2011, 15(2): 377-380.
- [5] 刘发权, 汪芳, 杨定才, 等. 螺旋 CT 三维重建在磨牙区种植牙手术中的临床应用价值 [J]. *实用口腔医学杂志*, 2013, 29(1): 130-132.
- [6] KONDO T, ONG S H, FOONG K W. Computer-based extraction of the inferior alveolar nerve canal in 3-D space [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2004, 76(3): 181-191.
- [7] YAU H T, LIN Y K, TSOU L S, *et al.* An adaptive region growing method to segment inferior alveolar nerve canal from 3D medical images for dental implant surgery [J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2008, 5(5): 743-752.
- [8] 陈健, 田捷, 薛健, 等. 多速度函数水平集算法及在医学分割中的应用 [J]. *软件学报*, 2007, 18(4): 842-849.
- [9] MALLADI R, SETHIAN J A, VEMURI B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(2): 158-175.
- [10] 张慧, 刘伟军. 基于多尺度统计形状模型的 Levelset 分割方法 [J]. *计算机工程*, 2006, 32(7): 191-193.
- [11] 曹宗杰, 闵锐, 庞伶俐, 等. 基于统计模型的变分水平集 SAR 图像分割方法 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(12): 2862-2866.