

# 基于 B-Snake 的三维图像骨架化方法<sup>\*</sup>

田绪红<sup>1,2</sup> 韩国强<sup>2</sup> 司徒志远<sup>1</sup> 陈茂资<sup>1</sup> 宋鸿陟<sup>1</sup>

(华南农业大学信息学院 广州 510642)<sup>1</sup> (华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510642)<sup>2</sup>

**摘要** 3D 图像数据由于其本身的复杂性,对其进行骨架化一直是 3D 图像处理中的一个难点问题。文中提出了一种 B-Snake 骨架化算法及 B-Snake 能量最小化求解法,同时讨论一种骨架化算法的评价方法。B-Snake 骨架化算法获取的骨架其连通性和光滑性隐含于 B-Spline 表达式中,而且在中心性及抗噪声性等方面也明显优于离散 Snake 算法。对模拟的测试数据和实际三维重建的植物根系图像进行了实验,结果都表明了文中提出的算法的有效性。

**关键词** 三维图像骨架化,离散 Snake, B-Snake

## 3D Image Skeletonization Based on B-Snake

TIAN Xu-hong<sup>1,2</sup> HAN Guo-Qiang<sup>2</sup> SITU Zhi-yuan<sup>1</sup> CHEN Mao-zi<sup>1</sup> SONG Hong-shi<sup>1</sup>

(College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)<sup>1</sup>

(College of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510642, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Skeletonization of 3D image is one of hard problem in 3D image processing. A B-Snake based algorithm to extract skeleton from 3D image and a solution to energy minimization of B-Snake are proposed in this paper. An evaluation method of 3D skeletonization algorithm is also discussed. The skeleton extracted by the proposed algorithm has nice connectivity and smoothness as it is implicit in the B-Spline representation. It also has better medialness, and less sensitivity to noise compared with Discrete Snake algorithm. Experiments on simulated testing images and real plant root images confirm the proposed approach.

**Keywords** 3D image skeletonization, Discrete Snake, B-Snake

## 1 引言

近年来,随着 MRI, CT 等三维重建技术的发展,3D 图像数据应用越来越广泛。骨架(skeleton)作为图像几何形态的一种重要拓扑描述,在 3D 数据的压缩<sup>[1]</sup>、物体识别与表面重建<sup>[2,3]</sup>、三维植物建模<sup>[4]</sup>及根系图像分析<sup>[5,6]</sup>、医学上计算机辅助诊断与辅助手术治疗<sup>[7]</sup>等方面具有非常重要的应用。因此,3D 骨架化方法近十多年来一直是 3D 图像处理中的一个研究热点。

图像的骨架通常要求满足如下特性。(1)连通性:骨架应与图像中前景物体具有相同的连通性,包括与原物体的拓扑结构保持一致;(2)中心性:骨架应位于图像中前景物体的中心;(3)细化性:骨架线通常要求单体素宽。另外,骨架线还应具有一定的光滑性,而且一种好的骨架化算法应具有较快的处理速度和较强的抗噪声能力。

目前,国内外学者提出了许多骨架化的算法,主要有三种类型:细化方法、基于距离变换的方法、路径规划及 Snake 模型方法。

细化方法是目前 3D 图像骨架化方法中研究最多、也是最成熟的方法。细化方法的基本原理是按照一定的顺序逐步剥除满足一定删除条件的边界点,直到没有可删除点为止。Ma<sup>[8]</sup>, Palagyi<sup>[9]</sup>等采用的模板方法确定边界上可删除点,即将边界点分成几种类型,针对每种类型的边界点,根据其 26 邻域点分布(有时需考虑更大邻域点分布)设计所有可删除模

板。若当前体素点和某一类的可删除模板匹配,则该体素点可删除。Amiya<sup>[10]</sup>提出了一种根据前景体素点附近曲率变化确定其是否为可删除点细化算法。Wong<sup>[13]</sup>提出的细化算法将三维图像用八分树形式表示,根据八分树的叶子结点及其相邻结点的分布确定叶子结点是否可删除。所有细化算法都存在如下问题:(1)不论是采用模板还是其它方法,可删除点的判断主要根据局部邻域点的分布决定,因而对局部噪声较为敏感,且骨架的光滑性较差。(2)算法的不同执行次序会导致最终骨架有一定差异。(3)由于细化算法通常需要许多次迭代,数据量较大时处理速度较慢。

距离变换方法是 2D 图像骨架化中十分常用的方法。基本原理是先计算原图像到边界的距离变换,然后找出距离变换后图像中所有局部极大值点;最后将这些局部极大值点连接起来得到骨架。对于 2D 图像,Niblack<sup>[12]</sup>等提出了鞍点(saddle point)概念,采用爬山法,用鞍点将局部极大值点连接起来,较好地解决局部极大值点连接问题。Gagvani<sup>[13]</sup>等人研究表明,直接将这种方法推广到 3D 是很困难的,因为 3D 情况下,一个点的邻域不存在唯一的排列序列,因而难以直接定义鞍点。樊<sup>[14]</sup>与张<sup>[15]</sup>等提出的直接基于距离变换的骨架化方法均未考虑局部极大值点的连接问题。

Zhou<sup>[16]</sup>的 3D 骨架化方法是目前该类方法中最具代表性的方法之一。该方法引入了两种距离变换,一种是传统的基于边界的距离变换(称为 BS-Coding),另一种基于某一种子点的距离变换(称为 SS-Coding)。其中 SS-Coding 用于确定

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金项目(60573019),广东省自然科学基金重点项目(05103541)。田绪红 博士研究生,副教授,主要研究方向为数学形态学、图像分析、数字几何处理等;韩国强 博士,教授,博士生导师,主要研究方向为多媒体技术、图像压缩与编码、小波变换等。

一系列等值簇(称 Cluster),以及各分支的端点(SS-code 极大值点);然后,依次从每个端点出发,将路径上各簇的 BS-code 极大值点连接起来,得到初步的骨架,再经过一些后处理,即可得到特性较好的骨架。

基于距离变换的骨架化方法主要问题有:(1)骨架的连通性需要一些后续处理才能得到;(2)基于边界的距离变换对边界噪声较为敏感。因此,3D 情况下,距离变换方法通常与其它方法结合起来使用。

采用路径规划(path planning)方法求 3D 图像的骨架起源于医学处理,如虚拟内窥镜中路径选择<sup>[17]</sup>、机器人路径规划及脉管共焦显微(CM)图像分支结构的定量分析<sup>[18,19]</sup>等。

其核心算法是根据最短路径原则将给定两点连接起来。用于求图像的骨架时,通常是选定一个参考点,然后将各分支的端点与参考点连接起来,得到一个初始的路径,最后将初始路径调整,使之趋于物体的中心从而得到骨架。Paik<sup>[18]</sup>, Deschamps<sup>[7]</sup>等提出的方法中分支端点的选取,需要人工的干预, Maddah<sup>[18,19]</sup>利用基于参考点的距离变换实现了分支端点的自动获取。初始路径中心化方面, Paik 采用了细化方法,而 Maddah 则利用距离变换及 Snake 方法。

该类方法所求骨架保证是单体素宽,拓扑结构及连续性都能很好保持。主要存在的问题:(1)物体表面不光滑将导致初始路径呈现锯齿状,从而中心化后得到的骨架不够光滑;(2)边界噪声会导致中心化产生偏差。

总体上看,现有的三维图像骨架化方法与实际应用的要求还有一定的距离。另外,也缺乏一种有效的评价方法或标准,对各种算法进行评判。

本文提出了一种基于 B-Snake 的三维图像骨架化方法,该方法采用了 Zhou<sup>[16]</sup>的两种距离变换及 Maddah<sup>[19]</sup>的 Snake 模型思想,通过在中心化过程中引入 B-Snake 模型,有效地解决了骨架的光滑性、中心性及对噪声敏感等问题。同时,文中提出了一种对骨架化算法进行评价的方法,并通过实验数据说明该方法的有效性。

## 2 基于 Snake 模型的骨架化方法

Snake 模型(Active Contour 模型)最早是由 Kass<sup>[20]</sup>等人提出来的,最近十多年来,它已经被越来越多的研究者成功地应用于计算机视觉的许多领域,如边缘提取、图像分割、运动跟踪等。Maddah<sup>[19]</sup>最先提出了基于 Snake 模型的三维图像骨架化方法。主要包括三个步骤:一是提取图像的分支端点;二是将各分支端点与一个参考点连接起来得到位于图像表面的初始骨架线;三是将上述各初始骨架线作为一条 Snake,在图像力的作用下使之逐步趋于图像中心,从而得到所求骨架。下面简单介绍每个步骤的实现原理。

### 2.1 分支端点提取

先在图像表面选取一个参考点  $P_r$ ,将参考点的距离值定义为零,将其它点的距离值初始化预先定义的极大值,即:

$$D_r = 0; D_i = \infty; P_i \neq P_r \quad (1)$$

从参考点的邻接顶点开始,采取广度优先算法,依次计算图像表面所有点到参考点的测地距离值,图像表面相信两点  $p, q$  的值采用近似欧氏距离:

$$D(p, q) = \begin{cases} n_1, & \|p - q\|^2 = 1 \\ n_2, & \|p - q\|^2 = 2 \\ n_3, & \|p - q\|^2 = 3 \end{cases} \quad n_1 = 3, n_2 = 4, n_3 = 5 \quad (2)$$

根据上一步得到的图像表面点的距离值,选取所有距离

值为局部极大的点来求得分支端点  $P_e (e=1, 2, \dots, N)$ 。

参考点  $P_r$  的选择,对于分支端点提取有重要影响。这里采用人机交互方式选取某一明显分支顶点作为  $P_r$ 。

### 2.2 初始骨架线构造

获取  $P_r$  与  $P_e$  点后,在图像表面将  $P_r$  与  $P_e$  连接起来,就可得到初始骨架线。

具体步骤:

(1)将求得的  $P_e (e=1, 2, \dots, N)$  按距离值从大到小排序,得到  $P'_e (e=1, 2, \dots, N)$ ;

(2)令  $e=1$ ,借鉴路径规划方法,在图像表面将  $P'_e$  与  $P_r$  连接起来,即:在图像表面寻找一条从  $P'_e$  到  $P_r$  的最短路径,就可得到一条初始骨架线。具体实现方法是采用基于距离值的最陡下降法;

(3) $e=e+1$ ,重复(2)中操作,直到  $e>N$ ;

(4)在步骤(2)中,除第一条初始骨架线外,其它骨架线都可能与已求得的初始骨架线相交和重叠。因此,要对相交和重叠部分的初始骨架线进行处理。

### 2.3 初始骨架线中心化

将前面得到的每条初始骨架线作为一条初始 Snake:  $S = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,在内力和外力的作用下,使其逐步收敛于图像内部的中心位置。算法暂不考虑内力的作用,而外力的计算方法是问题的关键。

先对图像中所有点进行基于边界的距离变换,然后求出距离变换场的梯度:

$$G(i, j, k) = \nabla D(i, j, k) = \begin{pmatrix} 0.5(D(i+1, j, k) - D(i-1, j, k)) \\ 0.5(D(i, j+1, k) - D(i, j-1, k)) \\ 0.5(D(i, j, k+1) - D(i, j, k-1)) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中,  $D(i, j, k)$  为点  $(i, j, k)$  的基于边界的距离值。则对于 Snake 上的点  $v_i$ ,其中内力表示为:

$$F(\vec{v}_i) = G(\vec{v}_i) - \frac{\vec{v}_i \cdot G(\vec{v}_i)}{|\vec{v}_i|^2} \vec{v}_i \quad (4)$$

求得  $F(\vec{v}_i)$  后,  $v_i$  即可按如下公式不断向图像中心移动  $v_i^* = v_i + w F(\vec{v}_i)$ ,直至 Snake 稳定为止。系数  $w$  根据实验结果不断进行调整与优化。

完成所有初始骨架线中心化后,仍可能出现骨架线相交和重叠问题,同样要进行相应处理等。

## 3 基于 B-Snake 模型的骨架化算法

上述方法中的 Snake 属于一种离散的模式,即 Snake 是由一些离散点构成,且每个点相对独立地在外力作用下运动。采用这种离散的 Snake 模型进行骨架化存在如下问题:(1)相邻点中心化后可能重叠,或相离,从而使得到的骨架不连通;(2)局部边界噪声可能导致某些点中心化产生偏离;(3)离散 Snake 上相邻点没有相互作用,会导致中心化过程中某些点不稳定,在中心附近来回振荡。

为此,这里提出一种基于 B-Snake 模型的骨架化方法,从而有效地解决上述问题。

### 3.1 B-Snake 模型

B-Snake 模型与离散的 Snake 模型的区别就是 Snake 不再是由一些离散点构成,而是用一条参数 B-Spline 曲线(通常采用三次 B-Spline)表示。一条  $n+1$  个控制点  $(P_i, i = \{0, 1, \dots, n\})$  构成的三次 B-Spline 曲线由  $n-2$  段  $(C_i(s), i = \{1,$

2, ..., n-2}, 0 ≤ s ≤ 1) 组成, 其中

$$C_i(s) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -2 & 1 \\ 2 & -5 & 2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 3 & 3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

基于上述定义, 一条 B-Snake 可定义如下:

$$r(s) = \sum_i C_i(s), \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (6)$$

对于 B-Snake 模型, 内部能量是不需要考虑的, 因为其光滑性已隐含于 B-Spline 表达式中。其外部总能量仍然由距离变换的梯度决定。

### 3.2 基于 B-Snake 骨架中心化

为将上述 B-Snake 模型用于三维图像骨架化方法, 先将 2.2 节中得到的每条初始骨架线进行重新采样, 得到 n+1 个控制点。根据式(5)、(6), 每条初始骨架线即可看成是一条 B-Snake。要得到用 B-Spline 表示的骨架, 同样需要在图像距离变换梯度场作用下, 将初始的 B-Snake 进行中心化。与离散 Snake 不同的是, 对 B-Snake 进行中心化是通过移动控制点来实现的, 而且所有控制点的运动方向要考虑使得整个 B-Snake 的能量逐步趋于最小值。

由于三次 B-Spline 曲线的每一段只由相邻的四个控制点决定, 文献[21]中提出了一种动态规划方法求解 B-Snake 能量最小化方法, 并将其用于二维图像的边缘提取。定义:

$$S_1(p_1, p_2, p_3) = \min_{p_0} \{ \epsilon_0(p_0, p_1, p_2, p_3) \} \quad (7)$$

$$S_i(p_i, p_{i+1}, p_{i+2}) = \min_{p_{i-1}} \{ \epsilon_{i-1}(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, p_{i+2}) + S_{i-1}(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \} \quad i \geq 2 \quad (8)$$

$S_1$  表示对于控制点  $p_0$  各种可能位置下曲线段 1 的最小能量,  $S_i$  表示对于控制点  $p_{i-1}$  各种可能位置下曲线段  $i$  的最小能量。

若对于每个控制点有  $m$  种可能的位置, 这种方法每一步计算复杂度为  $O(m^4)$ , 总的计算复杂度为  $O(m^4(N+1))$ 。该方法要求每个控制点的可能位置较少, 即  $m$  较小, 且控制点的初始位置使得 B-Snake 位于目标附近。否则 B-Snake 的收敛速度将非常慢。文献[21]中将 B-Snake 用于二维图像边缘提取时, 初始 B-Snake 的控制点是用人工方法分布于目标附近的, 且每个控制点只在  $3 \times 3$  邻域内移动, 即  $m=9$ 。而对于三维图像骨架化来说, 由于初始骨架线位于物体的表面, 通常与中心化骨架相距较远, 每个控制点的可能运动位置将远远大于文献[21]中的情况。因此, 上述基于动态规划的 B-Snake 求解方法不适合于 3D 图像骨架化算法。

为此, 这里提出一种控制点局部受力演化(Control-point Evolution by Local Force)的 B-Snake 的能量最小化求解方法。

对于三次 B-Snake, 不仅每一曲线段只由相邻的四个控制点决定, 而且每个控制点在能量场中的受力也只由至多四段曲线的受力决定。因此, 控制点的受力可由下列公式确定。

$$F(\vec{p}_0) = F(\vec{C}_1) \quad (9)$$

$$F(\vec{p}_1) = F(\vec{C}_1) + F(\vec{C}_2) \quad (10)$$

$$F(\vec{p}_2) = F(\vec{C}_1) + F(\vec{C}_2) + F(\vec{C}_3) \quad (11)$$

$$F(\vec{p}_i) = F(\vec{C}_{i-2}) + F(\vec{C}_{i-1}) + F(\vec{C}_i) + F(\vec{C}_{i+1}) \quad 3 \leq i \leq n-3 \quad (12)$$

$$F(\vec{p}_{n-2}) = F(\vec{C}_{n-2}) + F(\vec{C}_{n-3}) + F(\vec{C}_{n-4}) \quad (13)$$

$$F(\vec{p}_{n-1}) = F(\vec{C}_{n-2}) + F(\vec{C}_{n-3}) \quad (14)$$

$$F(\vec{p}_n) = F(\vec{C}_{n-2}) \quad (15)$$

其中:

$F(\vec{C}_i)$  表示曲线段  $C_i$  在距离场中的受力和, 其表达式为

$$F(\vec{C}_i) = \int_0^1 F(\vec{C}_i(s)) ds \quad (16)$$

上式中  $F(\vec{C}_i(s))$  表示曲线上点  $C_i(s)$  ( $0 \leq s \leq 1$ ) 在距离场中的受力, 类似式(4)计算:

$$F(\vec{C}_i(s)) = wG(\vec{C}_i(s)) \quad (17)$$

于是, 控制点的移动即可类似离散情况下 Snake 上点的运动方法, 即按如下公式不断向图像中心移动  $p_i^* = p_i + F(\vec{p}_i)$ , 直至 Snake 稳定为止。系数  $w$  同样根据实验结果不断进行调整与优化。

### 4 骨架化算法的评价

目前骨架化算法的评价主要是依靠主观视觉判断, 没有一种标准的测试数据, 也没有一种客观的数据比较方法。为此, 本文提出一种相对客观的评价方法, 包含两个方面: 一方面利用文献[22]方法生成测试数据, 该测试数据包含一些模拟骨架及由其生成的模拟图像, 即模拟图像的骨架是已知的; 另一方面是定义一种骨架相似度量标准。

对于测试数据, 设  $SK[K][L]$  为实际骨架, 由  $K$  条骨架线构成, 每条骨架线至多由  $L$  个骨架点构成。  $SK'[K'][L]$  为某一算法所求骨架, 由  $K'$  条骨架线构成, 每条骨架线也至多由  $L$  个骨架点构成(B-Snake 所求骨架按实际骨架点数采样)。现有骨架算法一般能保证所求的骨架分支数与实际骨架分支数相同, 可令  $K=K'$ 。再假定骨架线  $SK[i], SK'[i]$  ( $i=1, 2, \dots, K$ ) 一一对应, 且  $SK[i]$  与  $SK'[i]$  由相同数量的骨架点构成。

于是, 定义  $SK$  与  $SK'$  之间的距离为:

$$d(SK, SK') = \frac{1}{KL} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \| SK[i][j] - SK'[i][j] \| \quad (18)$$

在上述基础上, 对于一个给定骨架化算法的评价方法是: 先对测试用的模拟图像进行骨架化, 然后所求得的骨架与实际骨架根据定义的相似度量标准进行比较。一个算法所求的骨架与实际骨架相似程度越大, 则说明其性能越好。

对已知骨架的三维图像加入随机噪声, 然后采用不同的方法进行骨架化, 将所求的骨架与实际骨架采用上述方法进行比较, 就可以判断一种骨架化算法对于噪声的敏感程度。

### 5 实验结果

本文采用三组测试数据对离散 Snake 算法与 B-Snake 算法按上述方法进行了评价。图 1 为三组测试数据中模拟骨架, 图 2 为对应的模拟图像。

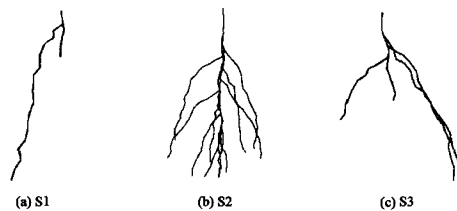


图 1 模拟骨架

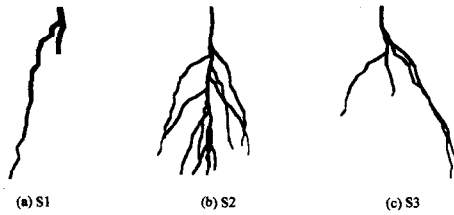


图2 模拟测试图像

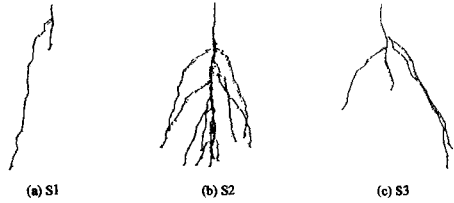


图3 离散 Snake 算法得到的骨架

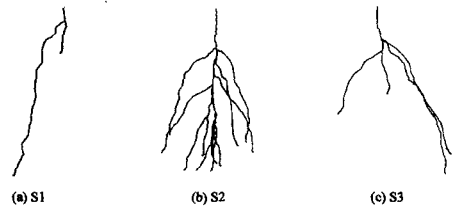


图4 B-Snake 算法得到的骨架

### 5.1 中心性评价结果

对图2模拟图像分别采用离散 Snake 算法和 B-Snake 算法进行骨架化,得到骨架如图3和图4所示。由图示可看出,在骨架的连通性及光滑性方面,B-Snake 算法明显优于离散 Snake 算法。图5给出了两种算法所求骨架与实际骨架的距离对比,距离度量采用式(18)的定义。实验结果表明,B-Snake 算法所求骨架与实际骨架的距离明显小于离散 Snake 算法相应的距离,说明 B-Snake 算法在中心性方面优于离散 Snake 算法。

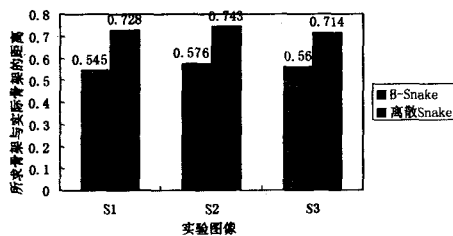


图5 中心性评价结果

### 5.2 抗噪声性评价结果

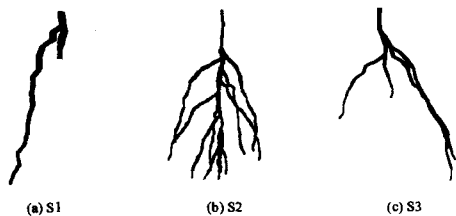


图6 加入噪声后的模拟图像

为测试算法对噪声的敏感程度,对于图2的模拟图像,在其表面加入随机噪声,如图6所示。然后同样分别采用离散

Snake 算法和 B-Snake 算法进行骨架化,得到的骨架如图7和图8所示。图示表明,噪声对离散 Snake 算法得到的骨架在连通性及光滑性方面的影响非常明显,而对于 B-Snake 算法则影响较小。

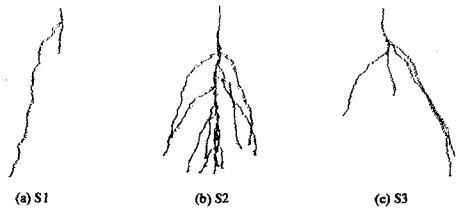


图7 离散 Snake 算法对图6求得的骨架

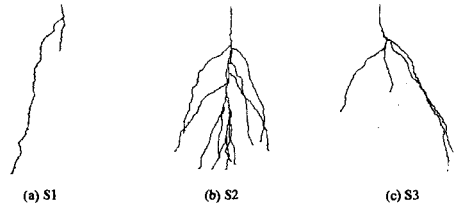


图8 B-Snake 算法对图6求得的骨架

图9给出了对于噪声图像两种算法所求骨架与实际骨架的距离对比。结果表明噪声对于离散 Snake 算法得到的骨架的中心性影响远远大于其对 B-Snake 算法的影响。

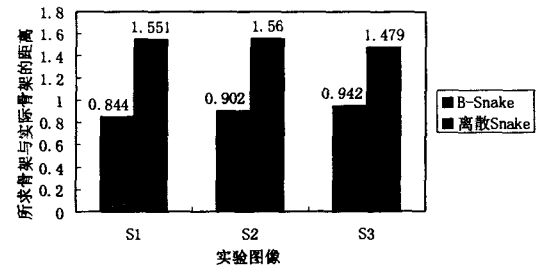


图9 抗噪声评价结果

本文也以实际3D重建的植物根系图像对离散 Snake 算法和 B-Snake 算法进行了测试,文献[6]详细介绍了这些图像的获取方法。图10分别给出了两幅3D重建的植物根系图像,及离散 Snake 算法与 B-Snake 算法对其所求的骨架。图示表明,B-Snake 算法对实际应用图像所求骨架也要优于离散 Snake 算法。

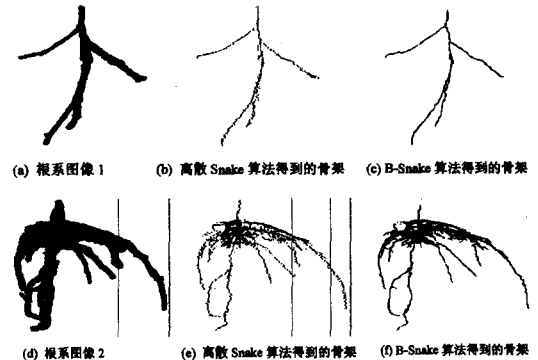


图10 实际3D重建的植物根系图像骨架化

结束语 由于这里提出的 B-Snake 算法在将初始 Snake

(下转第 265 页)

- Computing (ICSOC 2005), LNCS 3826. Springer, 2005; 87-100
- [8] Tsai W T, Paul R, Cao Z, et al. Verification of Web services using an enhanced UDDI server // Proceedings of IEEE WORDS, 2003; 131-138
- [9] Tsai W T, Paul R, Song W, et al. Coyote: An XML-based Framework for Web Services Testing // Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE'02). Tokyo, Japan, 2002; 173-174
- [10] Tsai W T, Paul R, Wang Y, et al. Extending WSDL to Facilitate Web Services Testing // Proceedings of 7th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE'02). Tokyo, Japan, 2002; 171-172
- [11] Meyer B. Object-Oriented Software Construction, 2nd Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, USA, 1997. [http://www.prenhall.com/allbooks/ptr\\_0136291554.html](http://www.prenhall.com/allbooks/ptr_0136291554.html)
- [12] Siblini R, Mansour N. Testing Web services // Proceedings of the 3rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, 2005; 135
- [13] Heckel R, Mariani L. Automatic conformance testing of web services // Proceedings of FASE, Edinburgh, Scotland, Apr. 2005; 2-10
- [14] Bertolino A, Polini A. The audition framework for testing Web services interoperability // Proceedings of IEEE Computer Society on EUROMICRO-SEAA, 2005; 134-142
- [15] De B. Web Services-Challenges and Solutions, WIPRO white paper, 2003. <http://www.wipro.com>
- [16] Foster H, Uchitel S, Magee J, et al. Model based verification of web service compositions // Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Automated Software Engineering. Montreal, Quebec, Canada, 2003; 152-161
- [17] Tsai W T, Chen Y, Paul R, et al. Cooperative and group Testing in verification of dynamic composite Web services // Proceedings of the 28th Annual International Computer Software and Applications Conference. Hong Kong, China, 2004; 170-173
- [18] Li Y, Li M, Yu J. Web Services Testing, the Methodology, and the Implementation of the Automation-Testing Tool // Grid and Cooperative Computing, Second International Workshop, GCC 2003. Shanghai, China, December 2003
- [19] Tsai W T, Chen Y, Cao Z, et al. Testing Web Services Using Progressive Group Testing // Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3309; 314-233
- [20] Xu W, Offutt J. Generating Test Cases for Web Services Using Data Perturbation. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2004, 29(5): 1-10
- [21] Dustdar S, Haslinger S. Testing of Service Oriented Architectures- A practical approach // Proceedings of the 5th Annual International Conference on Object-Oriented and Internet-Based Technologies, Concepts, and Applications for a Networked World. NODe 2004, Erfurt, Germany, September 2004
- [22] Tsai W T, Paul R, Yu L, et al. Scenario-based web service testing with distributed agents. IEICE Transaction on Information and System, 2003, E86-D (10): 2130-2144
- [23] Tsai W T, Zhang D, Chen Y, et al. A Software Reliability Model for Web Services // Proceedings of the 8th IASTED International Conference on Software Engineering and Applications, Cambridge, MA, November 2004; 144-149
- [24] 黄宁, 余莹, 张大勇. Web 服务软件测试技术的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2004(40): 147

(上接第 244 页)

中心化过程中,采用的是整体能量优化方法,因此仍可能导致最终 Snake 上某些局部点并不处于能量最低位置,这就是 B-Snake 算法所求的骨架中心性仍然有一定误差的原因。改进方面可考虑在用控制点进行 Snake 的演化之后,再用 Snake 上结点(Knots)进行一次演化。

### 参 考 文 献

- [1] Zhou Y, Thompson P, Toga A W. Extracting and representing the cortical sulci[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, 19(3): 49-55
- [2] He L, Han C Y, Everding B, et al. Graph matching for object recognition and recovery[J]. Pattern Recognition, 2004, 37: 1557-1560
- [3] Shamir A, Shaham A. Skeleton based solid representation with topology preservation[J]. Graphical Models, 2006, 68; 307-321
- [4] Fuhrer M, Jensen H W, Prusinkiewicz P. Modeling hairy plants [J]. Graphical Models, 2006, 68; 333-342
- [5] 田绪红,李志垣,韩国强,等.基于切面算法的三维植物根系图像骨架生成方法[C] //第十二届全国图像图形学学术会议论文集.北京,2005;655-658
- [6] 朱同林,方素琴,李志垣,等.基于图像重建的根系三维构型定量分析及其在大豆磷吸收研究中的应用[J].科学通报,2006,51(16): 1885-1893
- [7] Deschamps T, Cohen L D. Fast extraction of minimal paths in 3D images and applications to visual endoscopy[J]. Med Phys, 2001, 5(4): 281-289
- [8] Ma C M, Wan S Y, Chang H K. Extracting medial curves on 3D images[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23; 895-904
- [9] Paragyi K. A 3-subiteration 3D thinning algorithm for extracting medial surfaces[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(6): 663-675
- [10] Amiya A, Saito M. Thinning by curvature flow[J]. Journal on Visual Communication and Image Representation, 2006, 17; 27-41
- [11] Wong W T, Shih F Y, Su T F. Thinning algorithms based on quadtree and octree representations[J]. Information Science, 2006, 176; 1379-1394
- [12] Niblack C W, Gibbons P B, Capson D W. Generating skeletons and centerlines from the distance transform[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1992, 54(5): 420-437
- [13] Gagvani N. Skeletons and volume thinning in visualization[D]. MS thesis. Dept. of Electrical and Computer Eng., Rutgers Univ., New Brunswick, N. J., June 1997
- [14] 樊雅萍,黄生学,温佩芝,等.基于数字距离变换的3D模型骨架提取算法[J].信息与控制,2004,33(6): 685-693
- [15] 张若文,滕奇志,孙晓刚,等.一种快速简便的图像骨架变换方法.信息与电子工程,2003,1(1): 1-5
- [16] Zhou Y, Toga A W. Efficient skeletonization of volumetric objects[J]. IEEE Transaction on Visual Computer Graph, 1999, 5(3): 196-209
- [17] Paik D S, Beaulieu C F, Jeffrey R B, et al. Automated flight path planning for virtual endoscopy[J]. Med Phys, 1998, 25(5): 629-637
- [18] Maddah M, Afzali-Kusha A, Soltanian-Zadeh H. Efficient centerline extraction for quantification of vessels in confocal microscopy images[J]. Med Phys, 2003, 30(2): 204-211
- [19] Maddah M, Soltanian-Zadeh H, Afzali-Kusha A. Snake modeling and distance transform approach to vascular centerline extraction and quantification[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2003, 27; 503-512
- [20] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snake: active contour models [J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1; 321-331
- [21] Klein A K, Lee F, Amini A A. Quantitative coronary angiography with deformable spline models[J]. IEEE transactions on medical imaging, 1997, 16(5): 468-481
- [22] Tian Xuhong, Han Guoqiang, Chen Maozi, et al. Skeleton-based surface reconstruction for visualizing plant roots[C] // Proceedings of 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence-Workshops. Hangzhou, 2006; 328-332