

文章编号 1004-924X(2011)06-1367-08

采用局部分形的高效图像分割方法 在红外云图处理中的应用

刘 洋¹, 田小建^{1*}, 王 晴¹, 高 博²

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对已有的基于分形维数的图像分割算法难以快速计算一个小区域的分形维数, 计算复杂, 效率低的问题, 通过分析云的分形特征, 提出一种采用局部分形维数的方法对红外云彩图像进行分割。首先, 提出了一种高效算法来计算一段区间内的分形维数, 使用树状数组作为数据结构, 利用已经计算出来的信息, 在 $O(\log N)$ 的时间内得到结果; 然后, 通过计算云图每个水平线的分形维数, 将分形维数超过一定阈值的区域确定为云彩区域; 最后, 将每条水平线的高维数区间结合在一起得出整个分割结果。实验结果表明, 该方法解决了传统的分形维数算法在大量计算维数时算法复杂度高、计算时间长的问题, 对于 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的大型图像计算时间 $< 0.1 \text{ s}$; 同时该算法能够有效地将云彩和其他人工遮挡物以及背景光线变化和局部噪声区分开, 取得满意的处理效果。

关键词: 分形维数; 图像分割; 红外云图; 树状数组

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1367

Application of efficient image segmentation method based on local fractal in the infrared cloud image processing

LIU Yang¹, TIAN Xiao-jian^{1*}, WANG Qing¹, GAO Bo²

(1. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: Tianxj@mail.jlu.edu.cn

Abstract: An efficient image segmentation method based on local fractal dimension was proposed by analyzing the fractal characteristics of clouds to solve the problems existed in image segmentation algorithms in high complexity, low efficiency and difficult to calculate the fractal dimension of a small area quickly. Firstly, an efficient algorithm to calculate the fractal dimension of a small area was proposed. By utilizing a tree array as data structure and taking the advantage of calculated information, the result could be obtained in the time of $O(\log N)$. Then, through calculating the fractal dimension of each horizontal line in the infrared cloud image, the fractal dimension that exceeds a certain threshold area was identified as the cloud area. Finally, the segmentation result was gotten through combining all

收稿日期: 2010-04-30; 修订日期: 2010-11-04.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA8080502)

the high dimensions of each horizontal line. The result demonstrates that this method solves the problems of complexity and inefficiency of the traditional methods based on fractal dimension, and the computing time remains less than 0.1 s for a large image of 640 pixel \times 480 pixel. The algorithm can effectively separate the clouds from the other artificial objects, changed background light, and the local noise to obtain good segmentation results.

Key words: fractal dimension; image segmentation; infrared cloud image; tree array

1 引言

云彩是气象变化的主要反映,直接影响人类的各種社会活动,历来受到人们的广泛的关注与重视。近年来人们已提出了一系列新的业务和研究探测手段对云的各种要素进行探测,例如:激光雷达等其他仪器进行的云探测、飞机穿云对云中微物理要素的测量、各种波长的气象雷达对云中粒子及其运动的遥感以及利用气象卫星做全球云顶观测等。其中,红外成像具有不受气候光照影响等特点而得到广泛应用,其典型设备为红外云分析仪和红外云成像仪^[1]等。本文的工作是基于某云量分布与定位实时监测系统^[2],对观测的红外图像进行后续处理,从而判别出有云和无云区域,供其他系统决策参考。

对于云彩图像的判别,首先要进行图像分割。图像分割是从将人们感兴趣的区域从整体背景中区分出来,划分为若干互不交叉的区域,并能较好保持对象的原始轮廓信息^[3],分割的准确性是后续的目标检测和跟踪等任务的基础。由于红外图像^[4-5]具有低对比度、低信噪比、边缘模糊及无纹理特征等特点,而且易受到诸如干扰物辐射和传感器性能等的影响,图像较为模糊,因此对红外图像的准确分割比较困难。

图像分割算法可以分为自顶向下和自底向上两大类^[6]。常规的方法包括基于像素的方法、基于边缘检测的方法和基于区域的方法,以及混合方法等,其中,最大类间方差法(Otsu 算法)是一种比较常用的快速计算方法^[6]。上述方法大都没有利用到领域知识,对图像的畸变、不均匀性等难以适应,特别是在噪声抑制和边缘定位精度之间存在不可调和的矛盾,而分形技术可以用来解决这个问题。目前已有很多研究者提出各种利用分形理论进行图像分割的方法。文献 [7]对使用分

形进行图像处理的一些方法进行了综合阐述,张红等利用基于局部分形维度对图像进行边缘检测和分割^[8];一些研究者使用分形的另外一种数学形式,局部熵来进行计算,如张永亮等人提出利用小邻域内的局部熵值进行图像分割^[9],张薇薇等利用粒子群优化的方法计算最大模糊熵用来对红外图像进行分割^[10]。这些利用分形的方法大部分属于自底向上的方法,局限于一个小区域的分形维度计算。

在分形理论的研究中发现,以云彩为代表的自然物体具有显著的粗糙程度,因而具有明显的分形特征,而人造物体和空白背景不具有分形特征,因此在分形维数上可以将二者区分开来。

为了提高红外云彩图像的分割算法准确性,本文结合云彩图像的分形特征,提出了一种基于多维分形的图像分割方法。该方法通过高效的分形维数计算方法,计算出对分形维数贡献最大的图像区域,从而得到图像分割结果。该算法具有不受各种人工物体影响,对图像的各种线性变换不敏感等特征,将其应用到红外云彩图像处理中,取得满意效果。

2 分形维度计算

传统的欧式几何描述的是光滑规则的二维和三维物体,然而很多自然物体的边缘和表面都是粗糙和非光滑的,即使是一级近似也无法准确描述。这种自然景物具有自相似的特性,Mandelbrot 创建了分形几何理论,使用分形维数来描述这种自相似特性。前人的一些研究已经证实,云彩具有足够的分形特征,其特征维数和不同的云彩分类有关,夏德深等计算出,积雨云、层云、积云和卷云的分形维数从 2.191 到 2.759 不等,特别是常见的积云和卷云,具有明显的分形维数特征^[11]。

计算分形维数的方法有很多种,Chaudhuri等提出的差分盒维度是一种简单有效的方法^[12]。一个图像的分形维数计算如下

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N_r)}{-\log(r)}, \quad (1)$$

式中, N_r 表示半径为 r 的超球体(或超立方体)覆盖图像所需最少的球数, D 为图像的分形维度。在实际计算中,通常将图像划分为半径为 r 的超立方体,同时将灰度值也划分为 $h = G/r$ (G 为总灰度值)个盒子,考察第 i 个超立方体中灰度的最大值 GH_i 和最小值 GL_i 落入的盒子号,设为 H_i 和 L_i ,则

$$N_i = GH_i/h - GL_i/h + 1 = H_i - L_i + 1, \quad (2)$$

遍历 r 尺度下的整个图像,有

$$N_r = \sum_i N_i = \sum_i (H_i - L_i + 1), \quad (3)$$

根据一系列的 r 值,可以得到一组样本数据 (N_r, r),这些数据在双对数坐标图上基本处于一条直线,通过最小二乘法拟合出直线的斜率,就是分形维数 D 。即可以认为

$$\log(N_r) = -D \times \log(r) + \delta, \quad (4)$$

也就是
$$N_r = e^\delta \times r^{-D}, \quad (5)$$

在一般的计算过程中,存在两方面的问题。第一,只能对整体图像求分形维数,无法计算出其中一个局部的维度。第二,在进行直线拟合时,只考虑斜率,丢弃了拟合直线的截距所包含的信息。下面以一维情况为例,进行探讨。

假设一维曲线 l , 由两部分组成,其中一部分具有分数维 $D(1 < D < 2)$,另外一部分为空白噪声,其维数接近于 0,设为 d 。根据分形维数的定义,在尺度 r 下,第一部分和第二部分的值分别为:

$$N_r^1 = e^{\delta_1} \times r^{-D}, N_r^2 = e^{\delta_2} \times r^{-d}, \quad (6)$$

总的 N_r 值为:

$$N_r = N_r^1 + N_r^2 = e^{\delta_1} \times r^{-D} + e^{\delta_2} \times r^{-d}, \quad (7)$$

当 d 较小时,可以看出 $\log(N_r)$ 与 $\log(r)$ 之间仍然存在一定的线性关系,但具体值已经发生了变化。

使用一般的分形维数计算方法,只能计算出整体图像的维度,这可以用在图像的整体识别方面,但无法找到图像中哪一个局部具有较高的维度,因此难以用于图像分割。

3 基于局部分形维数的图像分割算法

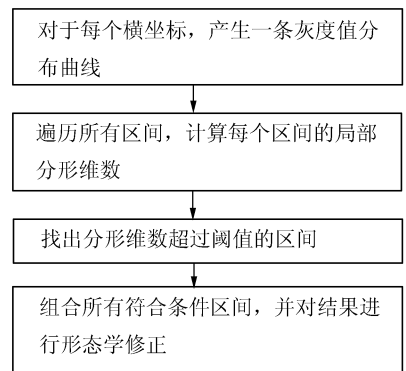
对于二维红外图像,其中存在分形维度大于 2 的云彩部分和分形维数接近于 1 的光线变化以及接近于 0 的天空背景和噪声点等。对于云彩区域部分,通过它的每条直线上面的灰度变化都是存在自相似特征的,其分形维数为二维云彩图像的分形维数减 1,直线的其余部分分形维数接近于 0。如果能够找出每条直线上分形维数接近于云彩特性的部分,将其整体连接到一起,就构成了整个前景图案。

在计算分形维数的过程中,如果直接套用前面传统的方法进行计算,对于长度为 n 的直线,要找出上面具有最大分形维数的子区域,需要计算 $n \times n$ 次,而每一次的计算都是 $O(n)$,那么二维的 $n \times n$ 图像,整体的计算复杂性为 $O(n^4)$,计算时间过长,难以满足应用需要。

针对以上问题,通过分析云的分形特征,提出一种自顶向下的采用局部分形维数的方法对红外云彩图像进行分割。

3.1 采用局部分形的高效图像分割方法

基于局部分形的图像分割算法(简称为 LFS)的总体框图如下:



假设图像的尺寸为 $m \times n$,详细内容阐述如下:

Step1:按照一个坐标轴(本文取横坐标)遍历图像,对于每一个 x ,产生灰度值分布曲线 $l_x, 1 \leq x \leq n$ 。

Step2:对于灰度值曲线,使用局部分形维数计算方法,计算每个区间的局部分形维数。即计

算 $frac(l_x, i, j), 1 \leq i < j \leq n$ 。

Step3: 如果 $frac(l_x, i, j) > r$, (r 为给定阈值), 则保留 $[i, j]$ 区间。

Step4: 对于所有 x , 保留符合条件的区间, 形成云彩前景图像, 并对结果进行图像形态学修正。

本算法相比于其他一些利用分形的图像分割算法而言, 主要特点在于计算了每个细节上的分形维度, 从而可以将那些不具有分形特征的人工物体排除在外。如果使用通常的分形维度计算方法, 本方法整体上计算复杂性较高, 没有实用价值, 因此以前的研究者忽略了此方法。本文使用了一种特别的数据结构进行这种计算, 从而保证算法能够在 $O(N^3 \times \log N)$ 时间内对整幅图像进行分割, 达到实用目的。

3.2 树状数组与局部和计算方法

首先介绍 LFS 算法中使用的数据结构: 树状数组。它是一种查询和修改复杂度都为 $\log(n)$

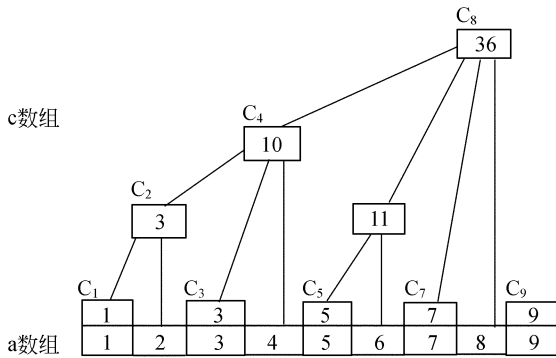


图 1 树状数组的构成

Fig. 1 The composition of the tree array

的数据结构, 它的构成类似一个完全二叉树, 如图 1 所示, 对于原始数据 a 数组而言, 中间结果数 c 依次保存了一个局部子集的和。更加准确地说, 定义 $tail(n)$ 为 n 的二进制表示中, 最后一个 1 前面数值丢弃, 只保留这个 1 和后面所有的 0。例如:

$$tail((101110)_2) = 10, tail(10100)_2 = 100, \quad (8)$$

这个数可以如此计算:

$$tail(n) = n \& (n - 1), \quad (9)$$

如果是使用补码运算, 也可以这样计算

$$tail(n) = n \& (-n), \quad (10)$$

其中, $\&$ 是位与运算, $\&$ 是位的异或运算。对于下标从 1 到 n 的原始数组 A , 定义:

$$c[k] = \sum_{i=k-tail(k)+1}^k A[i], \quad (11)$$

按照如上原则对于输入数组 a 建立的数组 c 称之为树状数组。利用树状数组, 可以快速地求出局部和 $pusm(s) = \sum_{k=1}^s A[k]$, 树状数组获取局部和的算法步骤如下:

输入: 已建立好的树状数组 C , 以及下标 k 。

输出: 返回原始数组中从 1 到 k 的和。

Step1: 令 $pusm = 0$;

Step2: 假如 $k \leq 0$, 算法结束, 返回 $pusm$ 值, 否则 $pusm = pusm + C[k]$;

Step3: 令 $k = k - tail(k)$, 转第二步。

上面的方法可以在 $O(\log N)$ 的时间内完成部分和的计算。以上方法的正确性可以参见有关文献[13]。

3.3 局部分形维数计算算法

下面, 利用上面的树状数组结构, 可以实现快速局部分形维数计算方法, 用来计算一条直线上所有区间的分形维数。

假设一维灰度曲线 $f(x)$, x 从 1 到 n , $f(x)$ 取值从 0 到 G 。使用如下算法可以快速计算出 x 坐标从 a 到 b 区间内的一段曲线的分形维数值, 局部分形维数计算算法步骤如下:

输入: 一维灰度曲线, x 从 1 到 n , $f(x)$ 取值从 0 到 G 。

Step1: 取 $r_1 = 2$, 计算每个 r_1 区间的灰度的最大值 GH_i 和最小值 GL_i , 存入数组 A_1 。

Step2: 取 $r_i = r_{i-1} \times 2$, 计算出每个 r_i 区间的灰度的最大值 GH_i 和最小值 GL_i , 为了加速计算, 可以直接 r_{i-1} 从层次的 GH 和 GL 值计算本层次的值, 即 $GH_k = \max(GH_{2k}, GH_{2k+1})$, 结果放入 A_i 。一直到 $r_i > n/2$ 为止。

Step3: 对每个 A_i 构造树状数组 C_i 。以上为初始化准备工作。

Step4: 当需要计算 a 到 b 区间的分形维数时, 遍历所有可能的尺度 r , 在该层次计算:

$$N_r(a, b) = \sum_{k=1}^b A_r(k) - \sum_{k=1}^{a-1} A_r(k) = pusm(b) - pusm(a-1), \quad (12)$$

Step5: 对于所有的 r 和 N_r , 通过最小二乘法拟合出分形维数 D 。

上述算法的运行时间中, 准备阶段的复杂度

为 $O(N)$; 计算阶段, 与 a 和 b 的二进制表示相关。在最好情况下, 可以直接得出结果; 在最坏情况下, 运行时间和树状数组的层数成正比, 即算法的最坏复杂度为 $O(\log N)$ 。这和从头计算该区间的分形维数所需的 $O(N)$ 的时间相比, 复杂度远远降低。

4 实验和数据分析

通过对由某云量分布与定位实时监测系统采集到的图片进行实验, 得到了满意的效果。图 2 给出了一个典型的红外云彩图像, 图 3 是其中一条水平线对应的灰度曲线, 可以看出, 存在局部的具有典型分形特征的区间, 本文目的就是把这个曲线中分形维度超过一定阈值的区域分割出来。图 4 是对图 2 使用本方法处理后的结果, 从中可以看出效果比较明显, 已将大部分云彩区域分割出来。图 5 给出了一个具有人工物体干扰的图片, 对其处理的结果如图 6, 传统的基于阈值的



图 4 本文方法分割结果
Fig. 4 Result of this paper



图 5 加入遮挡物后的图像
Fig. 5 Image after adding occludes



图 2 红外云图
Fig. 2 IR cloud image

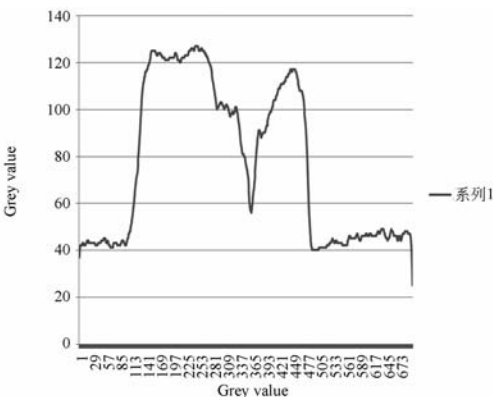


图 3 对应水平线的灰度曲线
Fig. 3 Gray curve corresponds to horizon



图 6 对遮挡后的图像进行计算的结果
Fig. 6 Calculated results for image with occludes

otsu 算法处理结果如图 7, 另外, 基于形态学的一种区域方法^[14], 金字塔算法的结果如图 8。可以看出, 对于人工物体, 由于没有分形特征, 常规方法难以将其与前景分开, 本方法可以明显地将其去除。



图 7 传统 otsu 算法计算的结果

Fig. 7 Results of traditional otsu algorithm

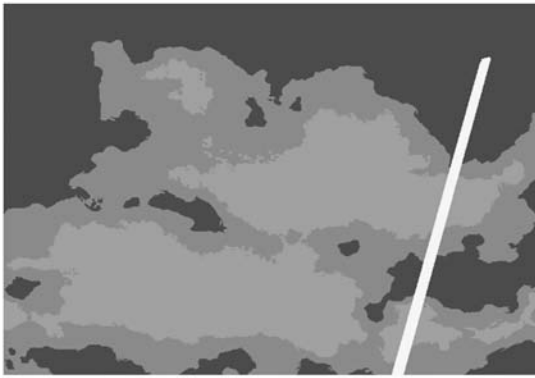


图 8 使用金字塔图像分割算法的结果

Fig. 8 Results of pyramid algorithm

表 1 给出了不同尺寸图像的计算时间,从中可以看出,本方法能够处理具有更高分辨率的大尺寸图像,与传统方法比,算法实效可以提高 30~150 倍,大大提高了运算速度,具有实用价值。

参考文献:

- [1] 孙学金,高太长,翟东力,等. 基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 763-764.
SUN X J, GAO T CH, CUI D L, *et al.*. Whole sky infrared cloud measuring system based on the uncooled infrared focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 763-764. (in Chinese)
- [2] 王吴京,王建立,王鸣浩,等. 大视场云层分布定位的光电测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 5(5): 1234-1241.

表 1 对不同尺寸的图像的计算时间比较

Tab. 1 Comparison of computing time for images with different sizes

图像尺寸	LFS/s	传统的分形计算方法/s
160×120	0.001 4	0.048 9
320×240	0.011 2	0.782
640×480	0.089 7	12.53

5 结 论

本文提出了一种基于局部分形维数的方法对红外云彩图像进行分割。该算法使用树状数组作为数据结构,能够利用已经计算出来的信息,在 $O(\log N)$ 的时间内得到结果,实验结果表明该方法充分利用了云彩的领域特性,即分形特征,能够有效地将云彩和其他人工遮挡物以及背景光线变化和局部噪声区分开,取得满意的分割效果。与传统方法比,算法实效可以提高 30~150 倍,并且对于 640×480 的大型图像计算时间小于 0.1 s。

目前,该算法是将二维的图像通过水平扫描线改变成一维进行处理。从原理上讲,任意方向的扫描线都是可用的,因此如何选择扫描方向,以及将不同方向的结合进行融合是未来的一个研究方向。其次,如果将目前的算法直接从一维提升为二维,会带来更大的复杂性和计算量的增加,如何将其进行改进,以直接应用到二维数据也是后续研究问题。另外,本算法所得到的结果从图像形态学上来说不够连续,如何进行修正,以及如何与其他方法进行相融合,也将在以后研究中探讨。

- WANG H J, WANG J L, WANG M H, *et al.*. Large field photoelectric measuring system for cloud position determination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 5(5): 1234-1241. (in Chinese)
- [3] ANAT L, YAIRWEISS. Learning to combine bottom-up and top-down segmentation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(1): 105-118.
- [4] 吴家伟,武春风,度文波. 红外图像实时显示增强系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 10(3): 52-55.
WU J W, WU CH F, TUO W B. Design of real-time infrared image enhancing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 10(3): 52-55. (in Chinese)

- [5] 丁金伟,张葆,李永刚,等. 气象测云红外成像系统的设计与分析[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2431-2434.
DING J W, ZHANG B, LI Y G, *et al.*. Design and analysis of infrared imaging system for cloud meteorological observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2431-2434. (in Chinese)
- [6] OTSU N. A threshold selection method from gray level histogram [J]. *IEEE Trans. on Syst. Man, Cybern.*, 1979, 9(1): 62-66.
- [7] 陈永强,陆安生,胡汉平. 基于分形的图像分析方法综述[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(7): 1781-1783.
CHEN Y Q, LU A SH, HU H P. Summary of image analysis method based on fractal [J]. *Computer Engineering and Design*, 2005, 26(7): 1781-1783. (in Chinese)
- [8] 张红,陆谊. 基于局部模糊分形维度的图像边缘检测算法[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(7): 171-177.
ZHANG H, LU Y. Image edge detection algorithm based on local fuzzy fractal dimension [J]. *Microelectronics & Computer*, 2005, 22(7): 171-177. (in Chinese)
- [9] 张永亮,卢焕章. 基于图像局部熵的红外图像分割方法[J]. 红外技术, 2006, 28(11): 656-660.
ZHANG Y L, LU H ZH. Infrared Image Segmentation Based on Local Entropy of Image [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(11): 656-660. (in Chinese)
- [10] 张薇薇,唐英千. 基于最大熵和粒子群优化的红外图像分割[J]. 电子器件, 2007, 30(5): 1736-1740.
ZHANG W W, TANG Y G. Maximum fuzzy entropy and particle swarm optimization (PSO) based infrared image segmentation [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, 30(5): 1736-1740. (in Chinese)
- [11] 夏德深,全盛,王健. 基于分数维与灰度梯度共生矩阵的气象云图识别—分数维对纹理复杂度和粗糙度的描述[J]. 南京理工大学学报, 1999, 23(3): 278-281.
XIA D SH, JIN SH, WANG J. Fractal dimension and GGCM based meteorology cloud pictures recognition description of texture complexity and roughness by fractal dimension [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1999, 23(3): 278-281. (in Chinese)
- [12] CHAUDHURI B, SARKAR N. Texture segmentation using fractal dimension [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(1): 72-77.
- [13] 周培德. 计算几何: 算法设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
ZHOU P D. *Computational geometry: Algorithm Design and Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2005. (in Chinese)
- [14] GOUTSIAS J. Non linear multiresolution signal decomposition schemes part I: morphological pyramids [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, 9(11): 1862-1876.

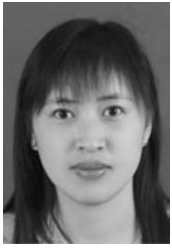
作者简介:



刘洋(1982—),女,吉林长春人,博士研究生,2005年于北京电子科技学院获得学士学位,2007年于吉林大学获得硕士学位,主要从事图像处理、信息电子学系统、数字信号处理等方面的研究。E-mail: phoenix_hua2006@163.com



田小建(1957—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,1982年于吉林大学获得学士学位,1988年于东北师范大学获得硕士学位,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事图像处理,信息电子学系统,高速电子学与光电子学,高速电子学与微波系统等方面的研究。E-mail: Tianxj@mail.jlu.edu.cn



王 晴(1980—),女,辽宁本溪人,博士研究生,讲师,2002年于东北师范大学获得学士学位,2007年于吉林大学获得硕士学位,主要从事图像处理,高速电子学与微波系统等方面的研究。E-mail:wqing@jlu.edu.cn



高 博,男(1980—),吉林长春人,博士研究生,讲师,2003年、2006年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事图像处理,锁模光纤激光器与超短光脉冲产生技术的研究。E-mail:gaobo0312@sina.com

●下期预告

T2 加权人脑 MR 体数据脑提取的实现

张广才,付宜利,王树国,高文朋,贾晓岚

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

为了实现人脑 T2 加权 MR 图像的脑组织和非脑组织的分割,提出了一种基于三维形变曲面模型和数学形态学算法的 MR T2 图像脑提取方法。该方法分为两级提取:第一级提取依据脑解剖学知识,影像学知识及 T2 加权 MR 脑图像的组织在灰度直方图中的分布规律,应用三维形变曲面模型和区域生长实现脑的初级提取;第二级脑提取则根据图像的局部信息,应用六邻域结构元素对脑初级提取结果进行数学形态学处理,使脑提取结果更精确。实验结果表明,使用该方法对人脑 T2 加权 MR 数据进行脑提取的准确率能到达 94% 以上。算法性能评估证明了本算法能够比较好地实现 T2 加权 MR 图像的脑提取。