

# 基于结构连续先验的 CT 图像序列自适应分割算法

王苏恺 潘晋孝 陈平

中北大学信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 在土层计算机断层成像(CT)图像序列中,由于分割目标的灰度值分布不一致,为目标区域的提取带来一定的难度。为解决此类问题,建立了基于结构先验的自适应分割方法。该方法通过设定初始切片的阈值,利用图像序列之间同一结构表征对象的连续性,以目标区域的面积变化作为约束条件进行递归分割,实现CT图像的自适应分割。对分割后的目标区域进行三维重构,以实现三维可视化。结果表明,该方法适用于分割目标灰度值不一致的图像序列,计算量小且能够精确地分割成千上万层图像中的目标。

**关键词** 图像处理; CT图像; 自适应; 先验结构信息; 递归分割; 三维可视化

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.111006

## Adaptive Segmentation Algorithm for CT Image Sequence Based on Structure Continuity as Prior Information

Wang Sukai Pan Jinxiao Chen Ping

*Shanxi Provincial Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*

**Abstract** Soil computer tomographic (CT) images sequence are difficult to extract the target because the gray of the segmented object has no uniform distribution. In order to solve the problems, we come up with an adaptive segmentation algorithm of CT images sequence based on structure continuity as prior information. We choose the initial image and determine the most appropriate threshold. Based on the continuity of the same object structure between the images sequence, the areal change of the object region is used as the prior information to perform recursive segmentation. The adaptive segmentation of CT images are achieved, and 3D visualization is realized by 3D reconstruction on the segmented object area. The results show that the proposed algorithm is applicable to CT images sequence with non-uniform gray distribution in the object regions, it results in small amount of calculation, and can precisely segment objects in thousands of target images.

**Key words** image processing; CT images; adaptation; prior structure information; recursive segmentation; 3D visualization

**OCIS codes** 100.1160; 100.2000; 100.6890; 100.6950

## 1 引言

在对土层地质的研究中,计算机断层成像(CT)技术由于其准确、快速、无损的特点得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。在三维CT成像过程中,探测器响应和射线辐射强度分布不均匀,且物体结构存在不一致性<sup>[2]</sup>,导致重建结果在垂直方向上每层切片的灰度水平不一致。单一阈值无法实现对整个序列图像的分割,使得到的分割结果出现过分割或者欠分割现象,要准确提取目标区域还需人为逐层进行阈值修正,工作量巨大。常用的自动分割方法为最大类间差方法,但由于目标区域的灰度值与背景区域的灰度值相近,无法通过最大化类间差来获取最优阈值<sup>[3]</sup>。

关于图像序列的分割方法,王琳等<sup>[4]</sup>提出了利用不同区域的光谱信息进行自适应分割,Funka-Lea等<sup>[5]</sup>

**收稿日期:** 2016-06-12; **收到修改稿日期:** 2016-07-15; **网络出版日期:** 2016-10-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(61227003,61301259,61471325,61571404)、山西省自然科学基金(2015021099)

**作者简介:** 王苏恺(1991—),女,硕士研究生,主要从事应用数学方面的研究。E-mail: wskzbdx@163.com

**导师简介:** 潘晋孝(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事CT理论与应用方面的研究。E-mail: panjx@nuc.edu.cn

提出了基于图割的分割方法,这些方法虽然可以有效提取目标区域,但都针对单层图像的目标提取,算法复杂,不适用于大规模的 CT 图像序列。申正文等<sup>[6]</sup>在此基础上提出了基于星形先验和图割的分割方法,实现了对图像序列的分割,但分割精度与目标块大小的选取有直接联系且运算复杂、效率低。王光磊等<sup>[7]</sup>提出了一种基于区域生长和聚类的算法,虽然可以分割整个图像序列,但仅给出序列的整体阈值,没有考虑自适应阈值算法为每一幅 CT 图像计算其最优阈值。Jain 等<sup>[8]</sup>提出基于区域生长的自适应分割方法,可以分割整个图像序列,但还需人为选取种子点,并没有实现完全的自动分割。以上方法均未利用到分割目标结构的连续性特点。

本文提出了一种基于结构先验的图像自适应分割算法。对其中一层图像设定合适的阈值进行分割,考虑图像序列中同一结构表征对象的连续性,利用此特点将目标区域面积的变化作为先验结构信息,以此为约束条件为下一幅图像选取合适的阈值,获得的结果又作为下一幅图像阈值选取的先验信息,从而对整个图像序列进行递归分割,分别计算出每幅图像的最佳分割阈值并对分割结果进行三维可视化。

## 2 图像序列的灰度及结构特性分析

### 2.1 图像序列的灰度信息

选取直径为 100 mm、高度为 300 mm 的圆柱形土柱作为被测对象,土柱由土壤、石粒以及植物根系等组成。图 1 所示为随机选取的三层土柱 CT 断层图像,用  $k$  表示层数,图 1(a)~(c)分别为  $k=98, 420, 800$  的图像。可以看出目标石粒的灰度与土壤灰度接近,且石粒边缘较为模糊,给分割带来很大的困难。图 2 所示为图像灰度曲线,灰度级分别分布在 100~170、90~150、70~120 之间。由于灰度级分布不一致,因此不能选取相同的阈值区分目标区域和背景区域<sup>[9]</sup>。

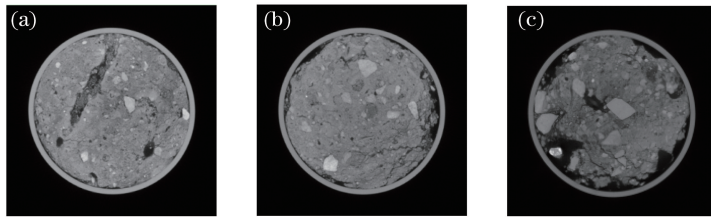


图 1 CT 图像序列。(a)第 98 层切片图像;(b)第 420 层切片图像;(c)第 800 层切片图像

Fig. 1 CT image sequence. (a) The 98<sup>th</sup> slice image; (b) the 420<sup>th</sup> slice image; (c) the 800<sup>th</sup> slice image

随机选取一个图像的最优阈值作为所有图片分割的整体阈值,实验选取图 1(b)的分割阈值作为整体阈值,即根据图 2 选取阈值,之后所有的图像都根据这个固定的阈值进行分割,分割结果如图 3 所示。图 3(a)出现了欠分割现象,即阈值过小,无法将目标和背景完全区分开来;图 3(b)将目标石粒分割出来,阈值正确;图 3(c)出现了严重的过分割现象,即阈值过大,将目标区域错划分为背景区域,几乎无法分割目标石砾。要想获取最优阈值还需逐层人工调整阈值大小,对于成千上万层的图像序列来说工作量巨大。

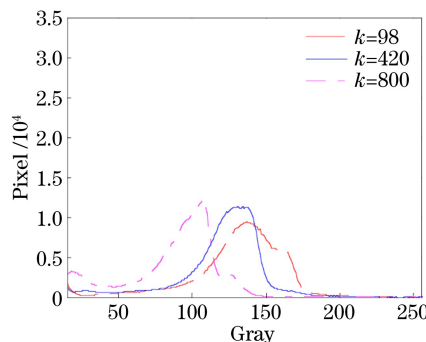


图 2 CT 图像灰度

Fig. 2 Gray of CT images

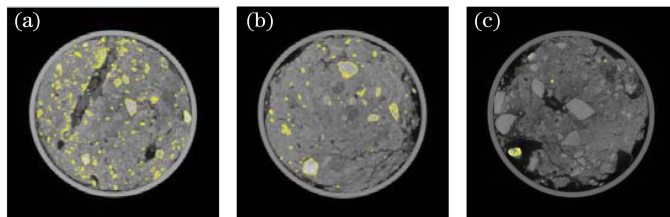


图3 采用固定阈值的分割结果。(a)第98层切片图像;(b)第420层切片图像;(c)第800层切片图像

Fig. 3 Segmentation results with a certain threshold. (a) The 98<sup>th</sup> slice image;  
(b) the 420<sup>th</sup> slice image; (c) the 800<sup>th</sup> slice image

常用的最佳阈值快速确定方法为 Otsu 法,该方法在类间方差最大的情况下是最佳的,但实验中土层 CT 图像由于目标石砾的灰度值与背景土块的灰度值近似,采用此方法并不能将目标区域分割出来。利用 Otsu 方法对图 1 中的土层切片进行分割后,结果如图 4 所示。Otsu 无法识别目标石砾与背景土块的灰度差别,将石砾与土块整体看作目标区域,无法分割目标石砾。

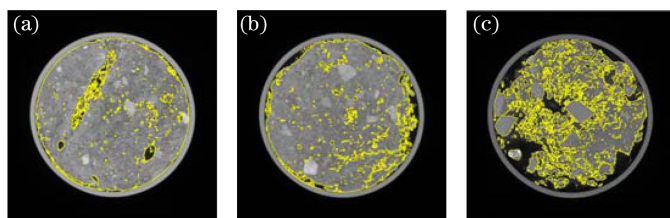


图4 采用 Otsu 方法的图像分割结果。(a)第98层切片图像;(b)第420层切片图像;(c)第800层切片图像

Fig. 4 Segmentation results with Otsu method. (a) The 98<sup>th</sup> slice image; (b) the 420<sup>th</sup>  
slice image; (c) the 800<sup>th</sup> slice image

## 2.2 图像序列的结构特性分析

选取被测物体在 200 kV 电压下每隔 0.2 mm 扫描一次得到的重建图像,原图中白色区域为分割目标石砾,背景区域为灰色土壤及黑色孔隙。根据图像灰度依次选取最佳阈值对目标石砾进行分割,得到的二值图像如图 5 所示。

分别计算分割后二值图像中目标区域的面积,即二值图像中不为零的像素个数,如果二值图像  $f(i, j)$  的大小为  $M \times N$ ,其目标区域的面积可表示为

$$S_a = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j), \text{ if } f(i, j) = 1. \quad (1)$$

经过计算得到其目标区域面积,如表 1 所示。

表 1 石砾面积参数

Table 1 Parameters of rock area

| Image No.    | 98    | 99    | 100   | 420   | 421   | 422   |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $S_a$ /pixel | 13900 | 13468 | 13070 | 22401 | 22927 | 23437 |

由表 1 可知,相邻切片目标的面积变化很小,并且由图 5 可以看出相邻切片的目标区域形状结构无明显变化,即同一目标表征对象的结构具有一致性。虽然不同层数目标区域的面积与背景区域面积的比值不同,但相邻层数之间面积的变化很小。可以利用此特点以每层切片中目标区域面积的变化率作为约束条件,实现 CT 图像的自适应分割。

## 3 基于结构连续先验的 CT 图像序列自适应分割算法

对于数字图像  $F_{M \times N} = [f(i, j)]_{M \times N}$ ,其中  $M \times N$  表示图像大小, $f(i, j)$  表示  $(i, j)$  处的灰度值, $f(i, j) \in G_L = \{0, 1, K, L - 1\}$ 。选取阈值  $t \in G_L$  和一对二值化的灰度级  $B = \{a, b\}$ , $a, b \in G_L$ ,对图像  $f(i, j)$  的阈值化可以表示为

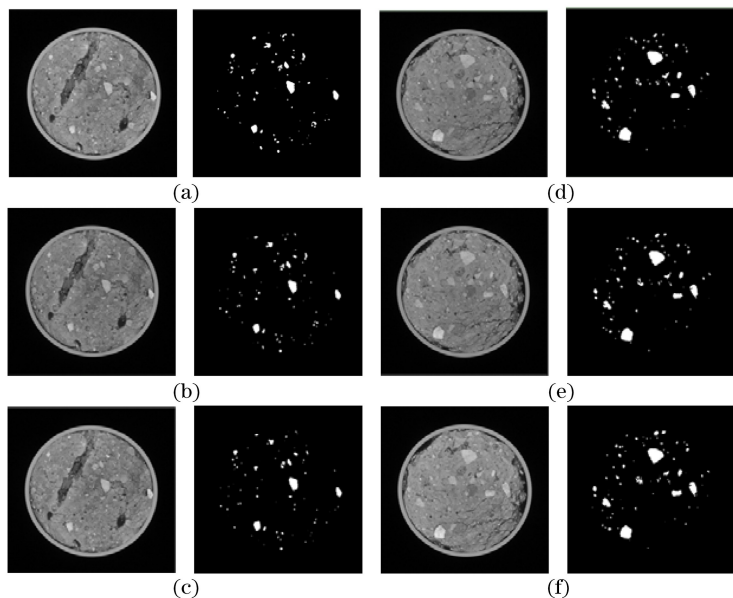


图 5 CT 断层重建图像及分割结果。(a)第 98 层切片图像及分割结果;(b)第 99 层切片图像及分割结果;(c)第 100 层切片图像及分割结果;(d)第 420 层切片图像及分割结果;(e)第 421 层切片图像及分割结果;(f)第 422 层切片图像及分割结果

Fig. 5 CT reconstruction images and segmentation results. (a) The 98<sup>th</sup> slice image and the segmentation result;

(b) the 99<sup>th</sup> slice image and the segmentation result; (c) the 100<sup>th</sup> slice image and the segmentation result;

(d) the 420<sup>th</sup> slice image and the segmentation result; (e) the 421<sup>th</sup> slice image and the segmentation result;

(f) the 422<sup>th</sup> slice image and the segmentation result

$$f(i, j) = \begin{cases} S_a, & f(i, j) > t \\ S_b, & f(i, j) \leq t \end{cases} \quad (2)$$

满足条件  $f(i, j) > t$  的  $S_a$  称为目标区域, 满足  $f(i, j) \leq t$  的  $S_b$  则称为背景区域。根据灰度曲线, 选取图中两峰之间峰谷点的灰度值作为图像序列中第一幅图像的阈值<sup>[10]</sup>, 将图像按(2)式分割为目标区域  $S_a$  和背景区域  $S_b$ 。采用其目标区域和背景区域的面积比值  $S_a/S_b$  作为下一幅图像阈值选取的先验信息。根据图像序列之间结构的连续性特点, 可以根据前一幅图像的分割信息对后一副图像进行较为准确的分割。

实验采用目标区域面积的比值作为先验结构信息, 以此来判断后一幅图分割结果的准确性, 根据目标区域的面积变化来确定阈值的取值范围。相邻图像中第  $N$  幅图像的目标与背景区域的比值为

$$S_N = \frac{S_{a_N}}{S_{b_N}} \quad (3)$$

相邻图像之间目标与背景区域面积的比值存在一定的线性关系,

$$\frac{|S_{a_{N+1}}/S_{b_{N+1}} - S_{a_N}/S_{b_N}|}{S_{a_N}/S_{b_N}} = \epsilon, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

在理想状态下, 连续切片的面积变化理论值  $A = 0$ , 但在实际操作中由于 CT 系统物理因素以及被测物体内部分布不均匀等因素的影响, 相邻目标面积的变化不为零。另外, 实验中的重建切片为每隔 0.2 mm 扫描一次得到, 因此取一个很小的范围作为  $A$  的取值(本文取  $A = 0.02$ )。代入(4)式计算得到  $\epsilon$ , 当面积变化的比值  $\epsilon$  小于理论值  $A$  时, 可以视为分割结束。因此, 分割结果的判断准则为

$$\frac{S_{a_{N+1}}/S_{b_{N+1}} - S_{a_N}/S_{b_N}}{S_{a_N}/S_{b_N}} = |\epsilon| \leq A, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

分别计算相邻两幅图像之间目标区域与背景区域的面积比  $\epsilon$ , 按照(5)式对分割阈值  $t$  进行校准。若  $|\epsilon| \leq A$ , 则判定分割完成, 输出阈值  $t$ 。若  $|\epsilon| > A$ , 说明相邻图像间的变化超出了设定的范围, 将阈值  $t$  修正为  $t \pm \Delta t$ 。当  $\epsilon > A$  时, 说明此时的阈值  $t$  取值偏小, 出现了欠分割现象, 按照一定的步长增大阈值, 直到满足  $|\epsilon| \leq A$ ; 当  $\epsilon < -A$  时, 说明此时阈值  $t$  取值偏大, 出现了过分割现象, 按照一定的步长减小阈值, 直到



满足  $|\epsilon| \leq A$ ; 若都无法满足, 则说明此时阈值变化造成的面积变化不在约束的范围之内, 应选取较小阈值作为最佳阈值输出。

## 4 实验结果

根据以上公式及实验数据, 分别计算相应目标区域与背景区域的面积比  $\epsilon$  和阈值, 并且根据(5)式作出具体判断。选取图 5 中的土层切片图像进行分割, 实验数据如表 2 所示, 实验结果如图 6 所示。分割全部 1394 张土层切片分割, 得到的阈值变化曲线如图 7 所示。

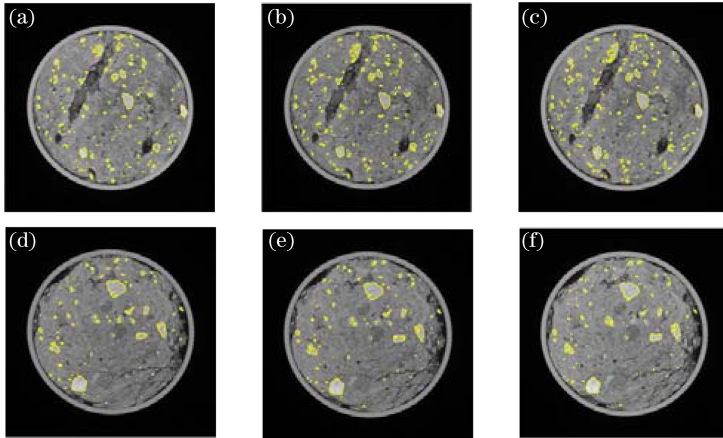


图 6 自适应分割结果。(a)第 98 层切片图像;(b)第 99 层切片图像;(c)第 100 层切片图像;  
(d)第 420 层切片图像;(e)第 421 层切片图像;(f)第 422 层切片图像

Fig. 6 Adaptive segmentation results. (a) The 98<sup>th</sup> slice image; (b) the 99<sup>th</sup> slice image; (c) the 100<sup>th</sup> slice image; (d) the 420<sup>th</sup> slice image; (e) the 421<sup>th</sup> slice image; (f) the 422<sup>th</sup> slice image

表 2 实验数据

Table 2 Experimental data

| Parameter  | 98 <sup>th</sup> slice | 99 <sup>th</sup> slice | 100 <sup>th</sup> slice | 420 <sup>th</sup> slice | 421 <sup>th</sup> slice | 422 <sup>th</sup> slice |
|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\epsilon$ | 1.0193                 | 1.0371                 | 0.9948                  | 0.9988                  | 1.0033                  | 0.9907                  |
| Threshold  | 163                    | 146                    | 156                     | 157                     | 159                     | 175                     |

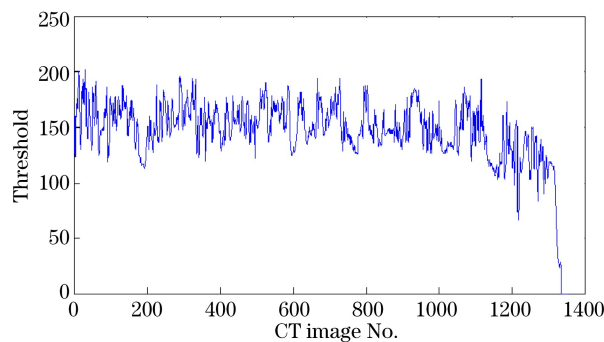


图 7 阈值变化曲线

Fig. 7 Change curve of threshold

对比采用固定阈值的分割结果(图 3)和 Otsu 法分割结果(图 4)可以看出, 本文方法分割效果良好, 未出现严重的过分割或欠分割现象, 对于对比度很小的图像也能准确地分割目标, 不受灰度值以及对对比度等约束条件的影响。由于相邻切片灰度变化较大, 得到的阈值曲线图波动幅度也较大。按照此方法分别将图像序列中的目标石砾和目标空隙提取出来, 进行三维可视化分析。实验运行环境为: intel(R)Core(TM)i7 CPU 2.20 GHz, 8G 内存, Windows 10 操作系统, 选取软件 Avizo 9.0.1 对分割后的图像序列进行三维可视化, 效果如图 8 所示, 可以直观地观察到整个土层中石砾的分布密度、大小以及孔隙结构等信息。

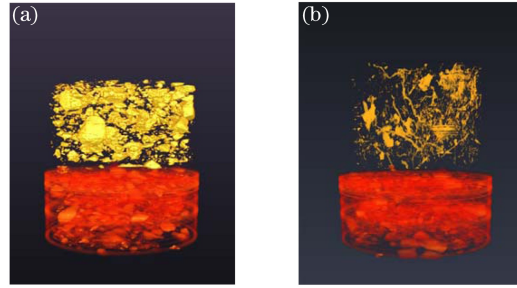


图 8 三维可视化结果。(a)石砾三维模型；(b)孔隙三维模型

Fig. 8 Results of 3D visualization. (a) 3D model of the stone; (b) 3D model of the pore

## 5 结 论

根据 CT 图像分割目标区域的结构和面积等特征,提出了基于结构先验的 CT 图像序列自适应分割算法,考虑连续图像序列中同一结构的表征对象的连续性,并利用此特点将目标区域面积的变化作为先验结构信息,以此为约束条件对图像进行递归分割。实验结果表明,该算法能够有效解决 CT 图像灰度不一致的分割问题,且计算量小,能够实现准确分割,提高了后续三维可视化的准确性。

## 参 考 文 献

- Zhou Xuecheng, Luo Xiwen, Liu Zhengmin. Advances in CT image segmentation technology for plant roots *in situ* [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(17): 4252-4256.  
周学成, 罗锡文, 刘正敏. 植物根系原位 CT 图像分割方法的研究进展 [J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(17): 4252-4256.
- Lu Zhaojin. Degradation elements analysis of digital radiographic image [D]. Taiyuan: North University of China, 2006.  
卢昭金. X 射线数字图像降质因素分析 [D]. 太原: 中北大学, 2006.
- Gonzalez R C. Digital image processing [M]. Beijing: Beijing Industry Press, 2004.  
冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 北京: 北京工业出版社, 2004.
- Wang Lin, Hu Cuiying, Pang Qichang, *et al.* TCM spectral imaging detection based on self-adaptive region segmentation method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 121002.  
王琳, 胡翠英, 庞其昌, 等. 基于自适应图像分割的中药光谱图像检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 121002.
- Funka-Lea G, Boykov Y, Florin C, *et al.* Automatic heart isolation for CT coronary visualization using graph-cuts [C]. IEEE International Symposium on Biomedical Imaging, 2006: 614 - 617.
- Shen Zhengwen, Gao Yuanyuan, Zhang Yu. Automatic segmentation of four dimensional computed tomography of lung tumor based on star shape prior and graph cuts [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2016, 33(2): 295-302.  
申正文, 高圆圆, 张煜. 基于星形先验和图割的肺部四维计算机断层扫描肿瘤自动分割 [J]. 生物医学工程学杂志, 2016, 33(2): 295-302.
- Wang Guanglei, Yuan Hao, Wei Shuai, *et al.* A novel sequence aorta CTA image segmentation algorithm based on region growing and clustering [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2015, 35(6): 644-650.  
王光磊, 苑昊, 魏帅, 等. 基于区域生长和聚类的主动脉 CTA 图像序列分割算法 [J]. 河北大学学报(自然科学版), 2015, 35(6): 644-650.
- Jain S, Gupta S, Gulati A. An adaptive hybrid technique for pancreas segmentation using CT image sequences [C]. International Conference on Signal Processing, Computing and Control, IEEE, 2015.
- Zhang Yujin. Image engineering [M]. 3<sup>rd</sup> edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.  
章毓晋. 图象工程 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- Han S Q, Wang L. The review of threshold methods in image segmentation [J]. System Engineering and Electronics, 2002, 4(6): 91-102.