

文章编号:1671-8879(2005)06-0034-05

## 沥青混合料图像阈值分割算法的实现

孙朝云<sup>1</sup>, 沙爱民<sup>2</sup>, 姚秋玲<sup>1</sup>, 张惠玲<sup>1</sup>

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**研究了沥青混合料数字图像自动检测分析系统中的图像分割算法,给出了各种阈值的选取方法;并结合沥青混合料数字图像灰度直方图的双峰特征,分析比较了采用平均灰度法、状态法、迭代法、基于最小误差理论法以及基于最大方差理论的阈值分割法不同处理结果,选用基于最大方差理论的方法对其进行分割处理。结果表明,该处理方法对沥青混合料自动检测系统测量精度的提高起着重要的作用。

**关键词:**道路工程;沥青混合料;阈值算法;图像分割;自动检测

**中图分类号:**U414.75; TN911.73 **文献标识码:**A

### Realization of threshold segmentation algorithm in asphalt mixture

SUN Zhao-yun<sup>1</sup>, SHA Ai-min<sup>2</sup>, YAO Qiu-ling<sup>1</sup>, ZHANG Hui-ling<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** To the automatic measurement and analysis system of the asphalt mixture, this paper studies the algorithm of image segmentation and gives the selection method of various threshold. Combined the bimodal characteristic of intensity histogram of the digital image with the comparative analysis of the actual processing results of various algorithms, it provides the reliable basis for the extraction of the follow-up characteristic values and the calculation of the parameter of the aggregate particle. And it plays an important role to the improvement of the measure accuracy of the whole system. 3 figs, 7 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; algorithm of threshold; image segmentation; automatic measurement

## 0 引 言

近年来,随着按体积设计沥青混合料理论的深入研究,沥青混合料的组成特性对提高路面质量显得尤为突出。数字图像处理技术作为一门应用越来越广泛的学科逐渐引入到道路建筑材料数字图像识别与特征提取方面。中国开展此项研究的高等学校主要有华南理工大学、同济大学和哈尔滨工业大学

等。以美国的 SHRP 小组研究的技术成果 SUPERPAVE 为新代表的理论体系,主要是在沥青混合料组成成分的体积指标方面做了相关的研究,而在沥青混合料级配自动检测系统方面尚未成熟的研究成果<sup>[1~4]</sup>。为此,本文针对沥青混合料自动检测系统研究中的图像分割算法进行了深入地研究,给出的算法能有效提高沥青混合料级配自动检测系统的测量精度。

收稿日期:2004-09-16

作者简介:孙朝云(1962-),女,安徽太和人,长安大学教授,博士研究生。

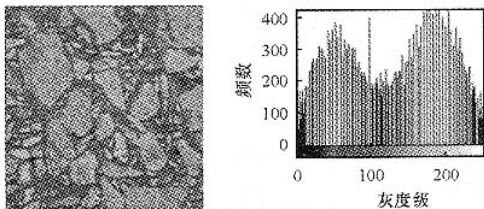
## 1 采用阈值法进行沥青混合料图像分割

将数字图像划分成互不相交(不重叠)区域,把目标对象从背景中检测、分离出来的过程即为图像分割。一旦图像被分割,辨认出的目标对象就可以被测量和分类。通常图像分割处理可采用4种不同的原理来实现,即阈值法,区域法,边界法和边缘法。

本文研究沥青混合料图像阈值分割算法,主要解决颗粒分离的问题,即以形状丰富且粒径不等的集料颗粒为目标,将其从沥青胶浆背景中提取出来。其具体步骤是:先把集料与沥青、空隙分割开来,然后再根据颗粒大小进一步分割粗集料和细集料,以便后面进行参数如级配、粒度分布、形状参数等的计算分析。在图像中不同区域之间的边界上一般具有灰度不连续性,即灰度的阶跃变化形成了区域的边界,所以可以寻找相邻像素颜色或灰度突变的算法,根据各个像素点的灰度不连续性进行分割。

### 1.1 阈值分割算法原理

从沥青混合料的数字图像中可以看到虽然集料颗粒多、形状复杂,但是它们与其中的沥青和空隙的近于黑色的颜色相比,集料颗粒显得较亮,从其直方图(图1)中也可以看出该特点。由于沥青混合料数字图像的灰度直方图具有非常明显的双峰特性,所以采用阈值法进行分割处理。因为阈值分割算法比较简单,处理速度比较快,同时使用阈值进行图像分割,它对目标对象与背景有较强对比度的图像分割特别有效。经实际使用得到了较好的分割效果。集料颗粒与沥青、空隙分离是至关重要的一步。颗粒分离的好坏直接影响到后续各个步骤处理的效果,从而决定着参数计算的准确性。



(a) 图像

(b) 直方图

图1 沥青混合料图像及其直方图

阈值分割的核心就是阈值选取的问题。图像中所有低于这一阈值的像素值将被重新赋值为黑色,而高于这一阈值的像素值赋值为白色。采用归一化的方法,就是低于阈值的赋0值,高于阈值的赋1值。因此,不论以何种方式选取阈值,取单阈值分割后的图像可定义为

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) > T \\ & (\text{标记为1的像素对应目标对象}) \\ 0 & f(x,y) \leq T \\ & (\text{标记为0的像素对应背景}) \end{cases} \quad (1)$$

阈值一般可写成如下形式

$$T = T[(x,y), f(x,y), P(x,y)]$$

其中, $f(x,y)$ 为图像像素点阵中 $(x,y)$ 点的灰度; $P(x,y)$ 为该点邻域的某种局部性质,如连通性。由式(1)可知, $T$ 在一般情况下可以是 $(x,y)$ , $f(x,y)$ , $P(x,y)$ 的函数。

阈值获取方法大致可分为全局阈值法和局部阈值法。全局阈值法是对整幅图像采用1个阈值进行分割,一般是以图像的灰度直方图为依据,将灰度阈值的值设置为某一常数。可以采用点相关技术产生阈值,如早期的基于误差设定的P-tile法和双峰法。这类方法不少是在假定已知图像中目标对象和背景灰度分布的情况下提出的。也可以采用区域相关技术,根据像素邻域间一定的关系来产生阈值。局部阈值法是将一幅图像分割为若干幅子图像,对每幅子图像求阈值。子图像的阈值可用求全局阈值的方法得到。由于局部阈值处理是对每幅子图像求取阈值,这种方法对光照不均匀的图像的分割十分有效。但是这种方法处理后的图像在子图像的连接处会出现灰度不连续,故还需要对这种图像做进一步的处理,消除不连续性。根据沥青混合料背景的灰度值在整个图像中可以合理地看作为恒定,而且所有的目标对象与背景都具有几乎相同的对比度,只有选择正确的阈值,采用一个固定的全局阈值法才有较好的效果,本文采用全局阈值法进行图像分割<sup>[4,5]</sup>。

### 1.2 阈值分割算法选取方法

选取阈值的方法有很多,如灰度平均值法、状态法、迭代法、基于最小误差理论的双峰法、基于最大方差理论的大津法和利用模糊集合确定阈值法等。

(1)平均灰度法。简单的对图像进行分割的阈值选取可以选择图像的灰度平均值,即

$$T = \frac{1}{N} \sum f(x,y)$$

式中: $T$ 为分割阈值; $N$ 为图像像素数目(等于图像高度与宽度像素数的积); $f(x,y)$ 为像素灰度值。

(2)状态法。状态法是人工指定阈值的方法,由于人的主观因素影响较大,一般不采用。但沥青混合料的灰度图像具有两峰夹一谷的特点,取阈值时

都大致在一个范围内,所以状态法也可考虑使用。

(3)迭代法。迭代法在初始条件中假设 1 个阈值,而在对图像的迭代运算中不断地更新这一假设阈值,以得到最佳阈值。初始阈值一般取灰度平均值,这样,以灰度平均值分割图像后,计算分割后的两类区域的平均值,低于初始阈值区域的平均值为  $T_b$ ,另一区域的平均值为  $T_o$ ,再计算  $(T_b + T_o)/2$ ,并以此值为新的阈值。然后重复上述步骤,直到下一次计算的阈值不再变化,即得到了最佳阈值,迭代停止。以  $T_0$  作为初始阈值的估计,则迭代中阈值的第  $k$  次估计为

$$T_k = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum_{i=0}^{T_{k-1}} ih[i]}{\sum_{i=0}^{T_{k-1}} h[i]} + \frac{\sum_{j=T_{k-1}+1}^N jh[j]}{\sum_{j=T_{k-1}+1}^N h[j]} \right] \quad (2)$$

其中,  $h[i]$  为图像中灰度级为  $i$  的像素个数。同样,当  $T_k = T_{k+1}$  时迭代停止,  $T_k$  就是得到的最佳阈值。

(4)基于最小误差理论的双峰法。该方法是一种产生最小平均分割误差的估计门限的方法。主要目的是选择 1 个阈值,在决定一个给定的像素是属于目标对象还是背景时使其平均出错概率降至最小,具体步骤是首先求图像的灰度分布,然后用统计方法决定最佳阈值。

一幅图像,设背景的灰度分布具有平均值为  $\mu_1$ ,标准差为  $\sigma_1$  的正态概率密度函数  $p(z)$ ,而目标对象的灰度分布也具有均值为  $\mu_2$ ,标准差为  $\sigma_2$  的正态概率密度函数  $q(z)$ 。背景占图像总面积的比为  $t$ ,目标对象占总面积的比为  $1-t$ ,整体图像的灰度概率密度可由下式给出

$$\omega = tp(z) + (1-t)q(z) \quad (3)$$

取阈值  $k$ ,  $z < k$  时为背景,  $z > k$  时为目标对象,则把目标对象错误归类为背景点的概率为

$$Q(k) = \int_{-\infty}^k q(z) dz \quad (4)$$

把背景错误归类为目标对象的概率为

$$1 - P(k) = \int_k^{\infty} p(z) dz \quad (5)$$

要使错误区分的概率  $t[1 - P(k)] + (1-t)Q(k)$  取最小值,只需令其微分为 0,求得  $k$  便是阈值。

由  $\frac{d}{dk} \{t[1 - P(k)] + (1-t)Q(k)\} = 0$  得

$$(1-t)q(k) = tP(k) \quad (6)$$

根据假定条件  $P(k)$  和  $Q(k)$  为

$$P(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp \left[ -\frac{(k - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \quad (7)$$

$$Q(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp \left[ -\frac{(k - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (8)$$

代入式(6),取对数得

$$\ln \sigma_1 + \ln(1-t) - \frac{(k - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} = \ln \sigma_2 + \ln t - \frac{(k - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \quad (9)$$

解得的  $k$  即为阈值。

(5)基于最大方差理论的大津法。选取阈值将目标从背景中分离出来,实际上就是将图像中的所有像素分为两类,或属于背景,或属于目标。根据概率论中的原理,若使分割的两组间方差最大,则得到的两组数据错分误差最小。

把直方图在某一阈值处分割成两组,当被分成的两组间方差为最大时决定阈值。不管图像的直方图有无明显的双峰,采用大津法都能得到较满意的效果。设一幅图像的灰度值为  $1 \sim m$  级,灰度值  $z$  的像素数为  $n_z$ ,于是

$$\text{总像素数} \quad N = \sum_{z=1}^m n_z \quad (10)$$

$$\text{各灰度值的概率} \quad P_z = \frac{n_z}{N} \quad (11)$$

然后用  $k$  将其分为两组  $A = (1 \sim k)$  和  $B = (k+1 \sim m)$ 。各组产生的概率为

$$\omega_A = \sum_{z=1}^k P_z = \omega(k) \quad (12)$$

$$\omega_B = \sum_{z=k+1}^m P_z = 1 - \omega(k) \quad (13)$$

A 的平均值

$$\mu_A = \sum_{z=1}^k \frac{zP_z}{\omega_A} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)} \quad (14)$$

B 的平均值

$$\mu_B = \sum_{z=k+1}^m \frac{zP_z}{\omega_B} = \frac{\mu - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \quad (15)$$

其中,  $\mu = \sum_{z=1}^m zP_z$  是全幅图像的灰度平均值。

$\mu(k) = \sum_{z=1}^k zP_z$  是阈值为  $k$  时的灰度平均值。

$$\mu = \omega_A \mu_A + \omega_B \mu_B \quad (16)$$

两组间的方差

$$\sigma^2(k) = \omega_A(\mu_A - \mu)^2 + \omega_B(\mu_B - \mu)^2 = \frac{[\mu\omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (17)$$

从  $1 \sim m$  之间改变  $k$ ,求两组间方差为最大值时的  $k$  即为阈值。

此方法是阈值自动选择的最优方法,它不仅适用单阈值的选择,也可向多阈值扩展。例如,若需将图

像分成 3 个部分,则在上述方法的基础上,将图像分成两组 A 和 B,阈值为  $k$ ,这时,继续对 A 和 B 采用上述同样的方法,得到阈值  $k_0$  和  $k_1$ ,比较 A 和 B 组内的方差大小,得到最大值,则该组的阈值为第 2 个所求的阈值。当所求的阈值增多时,以此类推。

(6)利用模糊集合确定阈值法。在集合论中,1 个元素要么属于 1 个集合,要么不属于这个集合。而在模糊集合论中,元素  $x$  是否属于 1 个集合  $S$  是 1 个概率问题,即表述为: $x$  属于  $S$  的概率为  $\mu_x$ 。对图像进行分割的过程可以归结为图像像素是属于背景集合还是目标集合的问题,在这里可以采用基于模糊集合论的方法。标准集合  $A$  和其补集  $A^c$  之间没有共同的元素。而对于模糊集合每个元素都有一定的概率使其属于  $A$  和  $A^c$ 。基于此,Yager 采用另一种描述模糊度的方法,认为  $A$  和  $A^c$  之间的模糊程度是模糊集合  $A$  的一个测度,可以表达为

$$D_p(t) = \left| \sum_g |\mu_x(g) - \mu_z(g)|^p \right|^{1/p} \quad (18)$$

其中,  $p$  为任意整数,对应欧氏距离测量。

$$\mu_x^- = 1 - \mu_x(g)$$

对和的估计可以用下式计算

$$\mu_x = \frac{\sum_{g=0}^t gh(g)}{\sum_{g=0}^t h(g)}, \quad \mu_z = \frac{\sum_{g=t+1}^{l-1} gh(g)}{\sum_{g=t+1}^{l-1} h(g)} \quad (19)$$

只要求得使  $D_p(t)$  最小时的  $t$  值就得到了 Yager 方法的最佳阈值。

## 2 阈值图像分割算法的实现与比较

对沥青混合料图像做阈值分割处理是为了突显集料的形状特征忽略沥青等背景,为后面的特征提取提供较准确的依据。理想的分割结果是把集料颗粒从沥青中完全分离,集料颗粒边缘闭合,内部无孤立小块或像素点;颗粒之间分界清晰无粘连。但是从编程试运行结果发现,这些分割算法均不能完全达到理想的分割效果,这里给出采用几种不同分割算法处理后的结果比较,从中选择出相对运算速度和处理效果都还较满意的算法。

### 2.1 阈值分割算法的实现

图 2(a)给出的是经过中值滤波处理后,待进行阈值分割的沥青混合料图像。图 2(b)是采用灰度平均值法处理后的效果图。该方法将图像中一半左右的像素划分为目标区域,分割的结果虽然大致上分离了集料和沥青等,但是集料颗粒之间有许多粘连,而且颗粒内部也有孤立像素。

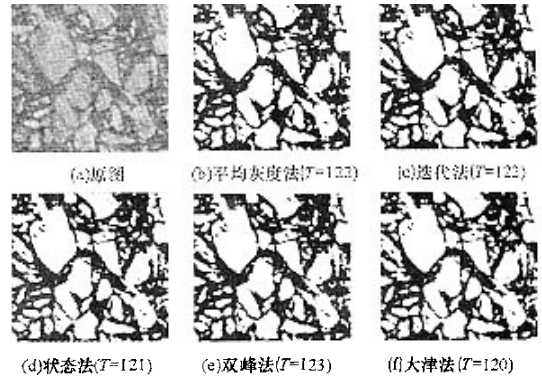


图 2 沥青混合料阈值法图像分割效果比较图

图 2(c)是采用迭代法处理后的效果图,采用迭代法得到的阈值与采用灰度平均值法得到的阈值相同,可见这两种方法分割效果基本一样。这是由于沥青混合料中不同目标对象的灰度差别较大,所以采用迭代法所得的阈值与采用灰度平均值法得到的阈值相近或相等,但是从理论分析来说,迭代法所得到的数据应更准确。图 3 给出了迭代算法流程图。

状态法是在得到灰度直方图之后,给出双峰之间的谷底值。这种方法计算量最少,但是人为因素干扰太大,不同的人可能取不同的值,得到不同的结果。对于谷底值容易获取且唯一的情况下,该方法是处理速度较快且准确率最高的阈值选取方法。

从理论上说,双峰法是最适合沥青混合料阈值选取的方法,但是因为双峰法在求阈值时先要求得目标和背景的灰度平均值及方差,所以编写的程序

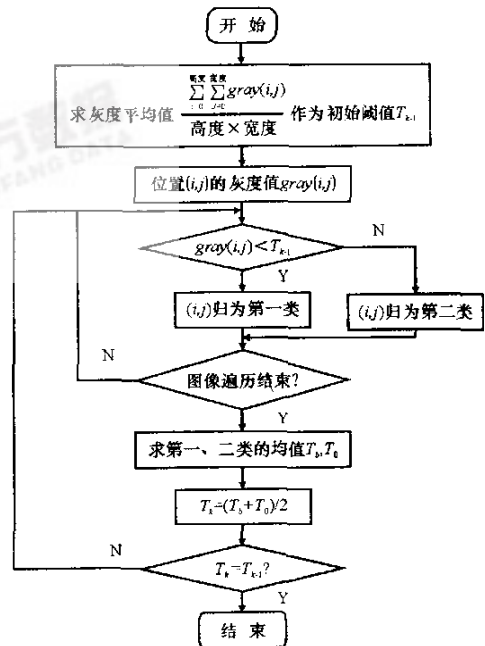


图 3 迭代算法流程图



比较复杂,而且在所有编程实现的阈值选取方法中运算所需时间最长,并且得到的效果也不比其他方法更好。与上述几种方法一样,采用大津法分割得到的二值图像中仍然存在颗粒粘连的问题,但其处理后的效果图中颗粒内部的孤立像素点明显少了很多,而且颗粒的边缘也更光滑。由于颗粒内部存在空洞(孤立像素点)多与少的问题对后续处理影响很大,因此,相比较而言,采用大津法处理的整体效果相对好些。

模糊集合确定阈值的方法理论和实现都很复杂,由于沥青混合料的灰度图像具有很明显的双峰特征,从运算效率考虑,模糊集合的方法并不适用于沥青混合料的图像分割。

## 2.2 阈值分割算法评价

综上所述,由于沥青混合料灰度图像具有明显的“双峰一谷”的特性,采用多种方法所得的阈值近似或相等。在理论上,迭代法、双峰法和大津法较完善;在运算速度上,灰度平均法和状态法执行的速度较快;在算法复杂度上,灰度平均法、状态法和迭代法较简单;在处理效果上,状态法和大津法得到的结果对于后面的处理更好一些。综合上述考虑,选择迭代法和大津法作为沥青混合料图像分割的主要处理方法,经过大量数据处理结果表明可以获得较满意的分割阈值,使图像能够实现较好的二值化效果,为后续沥青混合料特征值的提取及集料颗粒测量精度的提高提供了可靠依据<sup>[6,7]</sup>。

## 3 结 语

(1)道路建筑材料级配自动测试系统是目前国内外关注的热点之一。将数字图像处理技术中的阈值分割方法引入沥青混合料的自动检测是一种新的智能化的检测方式。

(2)研究了沥青混合料数字图像处理过程中的阈值图像分割算法,详细阐述了平均灰度法、状态法、迭代法、基于最小误差理论的双峰法以及基于最大方差理论的大津法的理论基础以及在沥青混合料图像处理阈值分割中的使用。通过对比分析提出了选用基于最大方差理论的大津法进行分割处理,能取得较满意的处理效果。

(3)提出了基于最大方差理论的大津法在沥青混合料图像阈值分割中的算法,为后续特征值的提

取和颗粒集料参数计算提供了可靠的依据,对系统检测精度的提高起着重要作用。

## 参考文献:

## References:

- [1] Rafael C G, Richard E W, 阮秋琦, 等. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.  
Rafael C G, Richard E W, RUAN Qiu-qi, et al. Digital image processing[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [2] Chen W T. A fast 2-D entropic thresholding algorithm[J]. Pattern Recognition, 1994, 27(2): 885-893.
- [3] 初秀民, 王荣本, 储江伟, 等. 沥青路面破损图像分割方法研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 11-14.  
CHU Xiu-min, WANG Rong-ben, CHU Jiang-wei, et al. Study of asphalt pavement surface distress image segmentation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 11-14.
- [4] 涂其远, 吴建华, 万国金. 动态阈值结合全局阈值对图像进行分割[J]. 南昌大学学报(工科版), 2002, 24(1): 37-40.  
TU Qi-yuan, WU Jian-hua, WAN Guo-jin. Image segmentation using dynamic threshold combined with global threshold[J]. Journal of Nanchang University (Engineering and Technology Edition), 2002, 24(1): 37-40.
- [5] 许志鸿, 陈兴伟, 刘 红, 等. Superpave 级配范围[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(3): 1-6.  
XU Zhi-hong, CHEN Xing-wei, LIU Hong, et al. Gradation scope of superpave[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 1-6.
- [6] 张 娟, 沙爱民, 高怀钢, 孙朝云. 基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(2): 18-22.  
ZHANG Juan, SHA Ai-min, GAO Huai-gang, SUN Zhao-yun. Automatic pavement crack recognition and evaluation system based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(2): 18-22.
- [7] 侯相深, 王哲人, 杨泽众. 路面损坏的图像处理算法浅析[J]. 公路, 2003, (3): 41-44.  
HOU Xiang-shen, WANG Zhe-ren, YANG Ze-zhong. Image processing arithmetic studying of the pavement breaking[J]. Highway, 2003, (3): 41-44.