

基于游程统计的含噪图像分割效果评价方法

张雪峰 范九伦 谢 颀

(西安邮电学院通信与信息工程学院 西安 710061)

摘 要 含噪图像的分割效果与其干扰噪声强度有着紧密的联系。为了对含噪图像的分割效果进行量化计算和分析,首先定义了一个评价含噪图像分割结果的差异函数,该函数值反映了含噪图像的分割结果和原始图像的分割结果之间的差异程度。同时,根据序列随机性检验方法中的游程测试方法,给出了一种针对含噪图像分割效果评价的方法,该方法基于分割图像的二值化灰度矩阵游程统计量,定义了评价图像分割效果的游程函数,在对含噪图像的分割效果进行评价时,可以计算分割图像的游程函数来进行量化比较。对含噪灰度图像的分割结果与相应的差异函数和游程函数之间的关系进行了实验分析,结果表明,差异函数和游程函数不仅表达简单、计算便捷,而且能够准确反映出含噪图像的干扰噪声强度和分割的结果图像之间的变化关系。

关键词 图像分割,噪声,评价,游程测试,统计量

中图法分类号 TN911.73 **文献标识码** A

Noised Image Segmentation Effect Evaluating Method Based on Run Length Statistic

ZHANG Xue-feng FAN Jiu-lun XIE Xie

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract There is close relationship between segmentation effect of noise disturbed image and noise intensity the image contained. In order to quantize computing and analysis of segmentation effect of noise disturbed image, a evaluating function for noised image's segmentation results was presented based on segmentation image which is not noised firstly. Then a noise disturbed image segmentation effect evaluating method was presented that is based on run length testing of sequence randomness verifying. Run length function is defined based on run length statistic of segmented image's binary gray matrix and this index is quantifying computed when evaluating noised disturbed image's segmentation effect. Simulation results of gray image, which is disturbed by noise, indicate that run length function is expressed simple, computing convenience, and can nicely reflect the changing relationship between segmentation effect of noise disturbed image and noise intensity the image contained.

Keywords Image segmentation, Noise, Evaluating, Run length testing, Statistic

1 引言

图像是用各种观测系统以不同形式和手段观测客观世界而获得的、可以直接或间接作用于人眼并进而产生视知觉的实体。人们可以用各种技术方式和手段对图像进行加工以获得需要的信息,图像分割技术是最常用的图像处理技术之一。

图像分割是进行图像理解与分析的基础。在计算机视觉技术领域,图像分割、目标的分离、特征的提取和参数的测量是非常重要的研究内容。相关技术已被广泛应用于信息处理的各个领域。

目前关于图像分割效果评价的主要方法有主观评价和客观评价两种。主观方法是以人的视觉感官作为图像分割准则,需要原图像的参与。最近文献[1]给出了一种基效果的评价依据,这种评价方法完全基于人的主观判断来进行,客观性较差,也无法实现评价过程的自动化。客观评价也称为量化

评价,该评价方法大体可归为两类:一类是直接的方法,也称为分析法^[1-3],分析法直接研究分割算法本身的原理特性,通过分析和推理得到算法的性能分析结论。这类方法由于只考虑到了分割算法本身的技术特点,而没有考虑到图像信息的复杂性和图像可能受到的干扰对分割结果的影响,因此实用性较差;另一类是间接的方法^[4-6],间接法可进一步细分为以下两种类型:一种是采用相应的优度参数描述分割的结果图像的特征,然后根据计算的优度值来判定分割算法的性能,这类方法所选取的优度参数往往是根据人的直觉建立,缺乏客观性和准确性,已有的优度函数的定义式也很复杂,计算过程繁琐,很难实现图像分割效果的实时评价;另一种是先确定理想的或期望的分割结果参考图,通过比较实际分割后的结果图像与参考图的差异来评定分割算法的性能,这种方法由于首先需要确定分割图像的标准结果图或参考结果,因此只能适用于对标准图像进行分割的结果评价上,在实际的图像分

到稿日期:2009-12-18 返修日期:2010-01-20 本文受陕西省自然科学研究计划项目(SJ08F24)和陕西省教育厅专项科研计划(09JK731,2010JK820)资助。

张雪峰(1975-),男,博士生,主要研究方向为信息安全,E-mail:zhangxuefeng3@163.com;范九伦(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为模式识别、信息安全;谢颀(1981-),男,硕士,主要研究方向为信息安全。

割过程中无法使用。

本文的目的是研究已有图像添加噪声后的分割质量评价问题。首先基于含噪图像和原始图像分割结果之间的差异定义了一个评价含噪图像分割结果的评价函数——差异函数,通过计算含噪分割图像和原图像分割结果之间的差异函数值可以较直观地反映出含噪图像的分割效果。在此基础上,我们还给出了一种基于游程统计方法的含噪图像分割效果量化评价方法。该评价过程将分割图像的二值化灰度矩阵看作由行向量构成的一个列向量,其中将每一个行向量看作二值序列,基于游程统计量定义了相应的游程函数,在对受到噪声干扰的图像的分割效果进行评价时,通过计算分割图像相应的游程函数来进行量化比较和分析。对受到噪声干扰的灰度图像的分割结果与相应的差异函数和游程函数之间的变化关系进行了实验分析,结果表明,本文给出的基于差异函数和游程函数的含噪图像分割效果评价方法能够准确反映出图像的分割效果和干扰噪声强度之间的变化关系。

为了保证图像的加密效果和安全性,人们往往使用循环迭代的方式对图像进行多次加密。本文在分析加密迭代次数、图像尺寸大小对图像信息熵和灰度变化平均值影响的基础上,引入了两个新的图像加密效果评价准则:基于加密图像灰度直方图均衡程度的图像灰度值变换效果评价准则——直方图均衡度;基于游程统计思想的图像置乱效果评价准则——游程统计量。这两个评价准则的取值不仅受图像大小变化的影响很小,而且计算过程不需要原始图像的参与。

2 含噪图像分割效果评价方法

图像分割方法很多,本文研究阈值图像分割方法对含噪图像的分割效果评价问题。由于在一维灰度直方图上进行含噪图像的分割效果不好,人们经常是在二维灰度直方图或三维灰度直方图上进行阈值选取,以达到抑制噪声的目的。本文采用 Otsu 算法对受到不同强度的椒盐噪声、Gauss 噪声以及由椒盐噪声和 Gauss 噪声组成的混合噪声干扰的灰度图像进行分割,二维 Otsu 灰度图像分割算法的基本原理描述如下^[7-11]。

设待分割的原始图像的灰度等级为 L 级,像素的邻域平均灰度等级也分为 L 级,在每个像素点处根据邻域的灰度信息计算其平均灰度,由此得到一个二元组 (i, j) ,其中 i 表示像素点的原有灰度值, j 表示应用邻域灰度信息计算出的像素点的平均灰度值,将二元组 (i, j) 出现的频数记为 f_{ij} ,则可以根据 f_{ij} 定义 (i, j) 的联合概率密度 $P_{ij} = \frac{f_{ij}}{M \times N}$,其中 $M \times N$ 为待分割图像的大小,图 1 给出二维灰度直方图的 XOY 平面图。

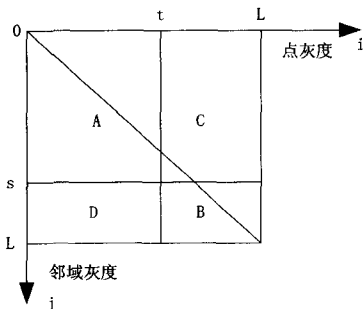


图 1 二维灰度直方图的 XOY 平面图

根据二维阈值 (s, t) 可知, A 和 B 的概率 $P_A(s, t)$ 和 $P_B(s, t)$ 分别为:

$$P_A(s, t) = P(A) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s P_{ij} \quad (1)$$

$$P_B(s, t) = P(B) = \sum_{i=s+1}^L \sum_{j=t+1}^L P_{ij}$$

A 和 B 对应的均值矢量 \bar{u}_A 和 \bar{u}_B 分别为:

$$\begin{aligned} \bar{u}_A &= (u_{A_i}, u_{A_j})^T = \left(\sum_{i=1}^t P(i|A), \sum_{j=1}^s P(j|A) \right)^T \\ &= \left(\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s \frac{i \cdot P_{ij}}{P_A(s, t)}, \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^s \frac{j \cdot P_{ij}}{P_A(s, t)} \right)^T \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_B &= (u_{B_i}, u_{B_j})^T = \left(\sum_{i=s+1}^L P(i|B), \sum_{j=t+1}^L P(j|B) \right)^T \\ &= \left(\sum_{i=s+1}^L \sum_{j=t+1}^L \frac{i \cdot P_{ij}}{P_B(s, t)}, \sum_{i=s+1}^L \sum_{j=t+1}^L \frac{j \cdot P_{ij}}{P_B(s, t)} \right)^T \end{aligned} \quad (3)$$

二维直方图上的总的均值矢量为:

$$\bar{u} = (u_i, u_j)^T = \left(\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L i \cdot P_{ij}, \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L j \cdot P_{ij} \right)^T \quad (4)$$

当 C 象限和 D 象限中的点数忽略不计时,有:

$$\begin{aligned} P_A(s, t) + P_B(s, t) &= 1, \bar{u} = P_A(s, t) \cdot \bar{u}_A + P_B(s, t) \cdot \bar{u}_B \\ \text{定义离散度矩阵 } S_B &\text{ 为:} \\ S_B(s, t) &= P_A(s, t) \cdot [(\bar{u}_A - \bar{u}) \cdot (\bar{u}_A - \bar{u})^T] + P_B(s, t) \cdot [(\bar{u}_B - \bar{u}) \cdot (\bar{u}_B - \bar{u})^T] \end{aligned} \quad (5)$$

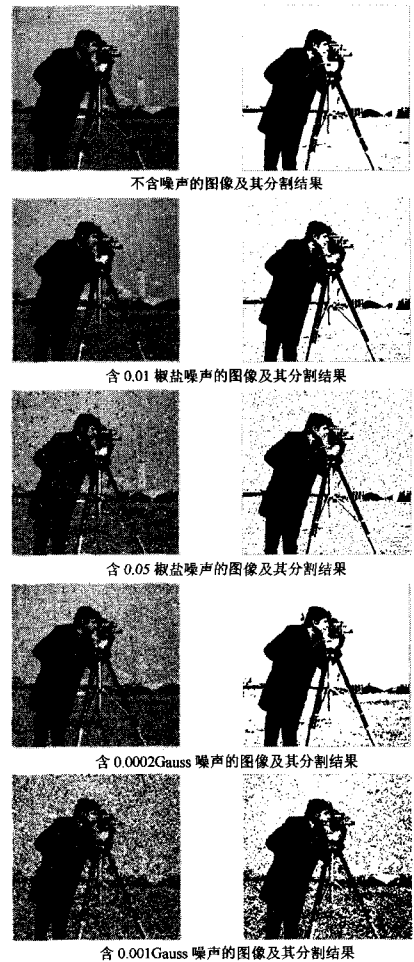


图 2 含噪图像的分割效果

我们以离散度矩阵 $S_B(s, t)$ 的迹 $Tr(S_B(s, t))$ 作为类间的离散测度准则,对应 $Tr(S_B(s, t))$ 取得最大值的 (s, t) 就是分割的最佳阈值。

对于受到不同强度噪声干扰的图像,分割效果一般取决于图像干扰噪声的强度。以下我们就以常见的椒盐噪声和

Gauss 噪声为例,分析当待分割图像噪声干扰时,分割效果与干扰噪声强度之间的变化关系。实验中待分割图像分别受到不同强度的椒盐噪声和 Gauss 噪声的干扰,相应的分割结果如图 2 所示。

通过图 2 的实验结果可知,相比于没有受到噪声干扰的图像,含噪图像随着干扰噪声强度的增大,分割效果越来越差。分割的结果图像中本来应该为背景白色的区域增加了黑色噪声点,相应的目标黑色区域中也增加了白色噪声点,而且分割的结果图像受到这种交叉噪声影响的程度也随着原图像噪声强度的增大而增大,从而直接导致图像的分割质量逐步下降。

对于含噪图像的分割效果随着干扰噪声强度的增加越来越差这一现象,我们以不含噪声图像的分割结果为标准,通过比较含噪图像分割结果与不含噪图像分割结果之间的差异程度,定义相应的差异函数来衡量含噪图像的分割效果。设待分割图像为 $Image$, 大小为 $m \times n$ 。 $Image1$ 和 $Image2$ 分别为图像不受噪声干扰的分割图像和受到噪声干扰的分割图像。则评价 $Image1$ 和 $Image2$ 之间差异程度的差异函数 D 定义为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n def(i, j)}{m \times n} \quad (6)$$

$$式中, def(i, j) = \begin{cases} 0, & Image1(i, j) = Image2(i, j) \\ 1, & Image1(i, j) \neq Image2(i, j) \end{cases}$$

根据差异函数 D 的定义可知,差异函数 D 的取值满足:
 $0 \leq D \leq 1$

对于受到噪声干扰的图像的分割结果,当 $D=0$ 时,表示分割的结果图像与不受噪声干扰时的分割结果完全相同,相应的分割效果较好;当 $D=1$ 时,表示两幅分割图像黑白值完全相反。 D 的值越接近 0.5, 两幅分割图像差别越大,说明受到噪声干扰的图像分割效果与不受噪声干扰时的分割效果差别越大,相应的分割图像 $Image2$ 效果越差。

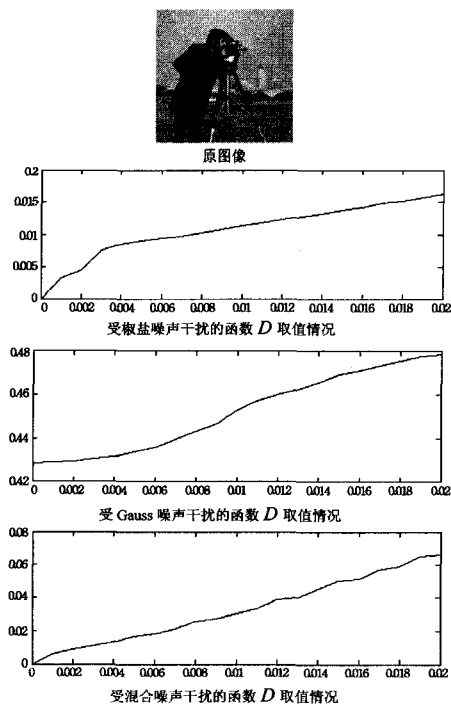


图 3 含噪强度与 D 的变化关系

以下给出基于差异函数 D 的含噪图像分割效果与干扰噪声强度之间变化关系的实验结果。我们在原图像中加入的椒盐噪声、Gauss 噪声和混合噪声的强度分别从 0 增加到 0.02。图 3 给出了分割结果图像与不受噪声干扰的分割图像之间相应的差异函数 D 的取值变化情况。

通过实验结果可知,图像的分割效果随着噪声强度的增大而越来越差,相应的差异函数 D 的值随之增大。说明差异函数 D 能够比较准确地反映出图像干扰噪声的强度与分割效果之间的变化关系。

以上给出的差异函数 D 的计算必须依赖原图像的分割结果,这一条件往往不利于该评价方法的实际应用。接下来我们给出一种基于游程统计的图像分割效果评价函数。该评价函数的计算仅仅依赖于含噪图像的分割结果。

游程是一串相同的序列元素,其前导和后继都与之不同^[12]。例如,0111001 从一个“0”的 1 游程开始,接着是一个“1”的 3 游程和一个“0”的 2 游程,最后结束于一个“1”的 1 游程。“0”游程称为间隔(gap),而“1”游程称为块组(block)。

由于分割图像对应的是一个二值化灰度矩阵,对于分割图像 $Image$, 大小为 $m \times n$, 则 $Image$ 相应地对应一个大小为 $m \times n$ 的二值化灰度矩阵: $M = [a_{i,j}]_{m \times n}$, 其中 $a_{i,j} \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。我们将分割的结果图像对应的二值化矩阵看作由若干个行向量构成的序列 $M = [A_1, A_2, \dots, A_m]^T$, 行向量中每一个元素 A_i 都可以看作是一个二值序列。现在应用评价序列随机性的游程测试方法对行向量序列 $M = [A_1, A_2, \dots, A_m]^T$ 进行分析。

当图像受到的干扰噪声增大时,相应的分割效果会越来越差,反映到分割结果图像上就是 $Image$ 中本来应该为背景白色的区域增加了越来越多的黑色噪声点,同时目标黑色区域中也增加了越来越多的白色噪声点。噪声点增多说明含噪图像的分割结果图像对应的二值行向量序列 $M = [A_1, A_2, \dots, A_m]^T$ 中所有元素 A_i 包含的游程总个数相应地增加,因为任意增加一个噪声点都会导致原来的一个长的游程被分割成多个短的游程。

根据以上分析,我们将含噪图像分割的结果图像对应的二值矩阵 M 的第 k 行包含的 0 游程的个数记为: num_k^0 , 1 游程的个数记为: num_k^1 , 则第 k 行包含的游程总数 num_k 满足以下关系: $num_k = num_k^0 + num_k^1$ 。对于图像 $Image$, 定义相应的游程函数为:

$$R = \frac{(\sum_{i=1}^m num_i^0 + \sum_{i=1}^m num_i^1)}{m \times n} = \frac{\sum_{k=1}^m num_k}{m \times n} \quad (7)$$

根据式(7)的定义可知,对于任意的分割结果图像 $Image$, 游程函数的值满足条件:

$$\frac{1}{n} \leq R \leq 1$$

同时,当游程函数增大时,说明结果图像对应的二值矩阵中的总游程数 $num = \sum_{i=1}^m num_k$ 增大,相应的结果图像中交叉噪声的强度也在增大,图像的分割质量在下降。

3 实验结果

以下分别对受到不同强度椒盐噪声、Gauss 噪声和混合噪声干扰的图像分割效果与相应的差异函数 D 和游程 R 函

数之间的变化关系进行实验分析。其中灰度图像受到的椒盐噪声和 Gauss 噪声的强度从 0 逐步增加到 0.02。

为了直观地表示出随着图像干扰噪声的强度的增加,相应的图像分割效果和游程函数的变化情况,我们分别给出了噪声强度分别为 0,0.01 和 0.02 时相应的图像分割效果以及评价函数——差异函数和游程函数随干扰噪声强度增大的变化曲线。混合噪声为椒盐噪声和 Gauss 噪声构成的强度从 0 逐步增加到 0.01。我们分别给出了噪声强度分别为 0,0.005 和 0.01 时,相应的图像分割效果以及差异函数和游程函数随干扰噪声强度增大的变化曲线。

通过对图 4—图 12 和表 1—表 3 中受到不同强度噪声干扰的灰度图像分割效果和相应的评价函数——差异函数和游程函数之间的变化关系进行分析可知,随着干扰噪声的强度逐步增大,灰度图像的分割质量越来越差,同时相应的差异函数 D 和游程函数 R 的值也随着噪声强度的增大而增大。说明本文定义的评价函数能够准确反映出灰度图像分割效果与干扰噪声强度之间的变化关系。



图 4 受椒盐噪声干扰的分割效果

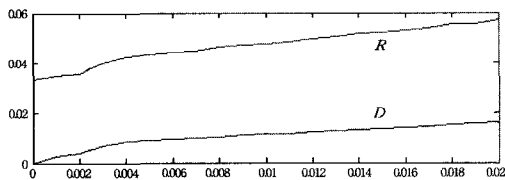


图 5 图像 1 的差异函数 D 和游程函数 R 变化趋势

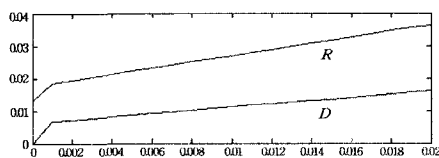


图 6 图像 2 的差异函数 D 和游程函数 R 变化趋势

表 1 噪声强度与函数值之间的变化关系

噪声强度	游程函数 R		差异函数 D	
	图像 1	图像 2	图像 1	图像 2
0	0.0335	0.0129	0.0000	0.0000
0.002	0.0420	0.0203	0.0045	0.0073
0.004	0.0486	0.0270	0.0084	0.0083
0.006	0.0585	0.0374	0.0094	0.0093
0.008	0.0722	0.0501	0.0104	0.0103
0.01	0.0880	0.0674	0.0113	0.0112
0.12	0.1056	0.0862	0.0123	0.0122
0.14	0.1257	0.1064	0.0132	0.0132
0.16	0.1496	0.1302	0.0143	0.0142
0.18	0.1728	0.1541	0.0154	0.0153
0.02	0.1986	0.1798	0.0163	0.0163

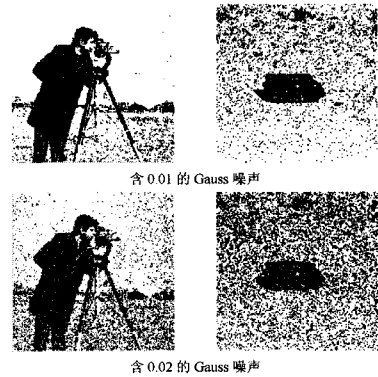


图 7 受 Gauss 噪声干扰的分割效果

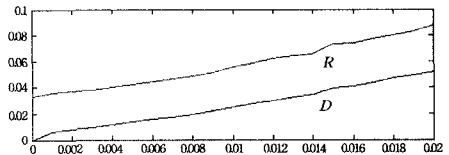


图 8 图像 1 的差异函数 D 和游程函数 R 变化趋势

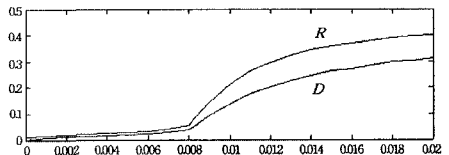


图 9 图像 2 的差异函数 D 和游程函数 R 变化趋势

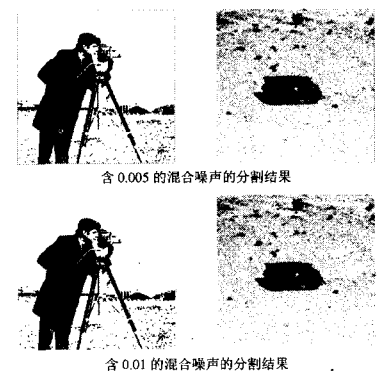


图 10 受混合噪声干扰的分割效果

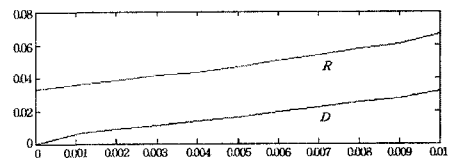


图 11 图像 1 的差异函数 D 和游程函数 R 变化趋势

表 2 噪声强度与函数值之间的变化关系

噪声强度	游程函数 R		差异函数 D	
	图像 1	图像 2	图像 1	图像 2
0	0.0335	0.0129	0.0000	0.0000
0.002	0.0393	0.0192	0.0078	0.0105
0.004	0.0497	0.0252	0.0114	0.0164
0.006	0.0622	0.0326	0.0155	0.0234
0.008	0.0775	0.0747	0.0192	0.0388
0.01	0.0926	0.2222	0.0251	0.1366
0.12	0.1114	0.2917	0.0301	0.2022
0.14	0.1204	0.3384	0.0344	0.2458
0.16	0.1248	0.3681	0.0412	0.2719
0.18	0.1432	0.3854	0.0470	0.2978
0.02	0.1577	0.4038	0.0520	0.3125

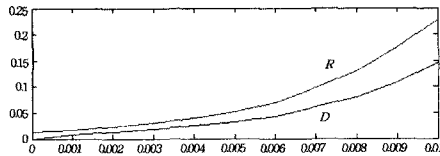


图 12 图像 2 的差异函数 D 和游程函数 R 变化趋势

表 3 噪声强度与函数值之间的变化关系

噪声强度	游程函数 R		差异函数 D	
	图像 1	图像 2	图像 1	图像 2
0	0.0333	0.0133	0.0000	0.0000
0.001	0.0362	0.0171	0.0058	0.0080
0.002	0.0385	0.0230	0.0085	0.0131
0.003	0.0414	0.0304	0.0112	0.0188
0.004	0.0435	0.0399	0.0135	0.0252
0.005	0.0467	0.0510	0.0162	0.0322
0.006	0.0507	0.0686	0.0190	0.0427
0.007	0.0540	0.0971	0.0219	0.0596
0.008	0.0581	0.1300	0.0252	0.0796
0.009	0.0605	0.1752	0.0275	0.1081
0.01	0.0669	0.2279	0.0324	0.1456

结束语 为了对含噪图像的分割效果进行量化计算和评价,本文首先给出了一种基于比较含噪图像分割结果与原图像分割结果之间差异程度的评价函数——差异函数来对含噪图像的分割效果进行量化评价的方法。在此基础上,我们进一步给出了一种基于分割图像二值化灰度矩阵游程统计量定义的含噪图像分割效果评价函数——游程函数,在对受到噪声干扰的图像的分割效果进行评价时,可以通过计算分割图像相应的差异函数和游程函数来进行量化比较和分析。

我们还对受到噪声干扰的灰度图像的分割结果与相应的评价函数——差异函数和游程函数值之间的关系进行了实验

(上接第 258 页)

传算法参数的选择问题采用了自适应策略。同时,结合自适应加权广义形态滤波的思想构建基于遗传优化的多结构多尺度自适应加权形态滤波器,其滤波效果与中值滤波、传统的形态滤波、广义形态滤波及在此基础上改进的滤波方法进行了比较,从图像信噪比可看出采用本文提出的算法滤波效果好,算法可行。

参 考 文 献

[1] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998(4)
 [2] Zhang Y J. Segmentation evaluation and comparison: a study of several algorithms[J]. SPIE Visual Communication and Image Processing, 1993, 2094: 801-812
 [3] Fu K S, Mui J K. A survey on image segmentation [J]. PR,

分析,结果表明含噪灰度图像的分割结果随着干扰噪声强度的增大越来越差,相应的差异函数和游程函数值也越来越大,说明本文给出的两个评价函数能够比较准确地反映出两者之间的变化关系。本文给出的评价函数的定义不仅表达简单、计算便捷,便于实际应用,而且能够准确反映出图像的分割效果与干扰噪声强度之间的变化关系。

参 考 文 献

[1] 吴成柯,毕笃彦,侯格贤. 图像分割质量评价方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2003, 4(5A): 39-43
 [2] 狄宇春,邓雁平. 基于多层次灰关联分析的图像分割性能评估[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(10): 1153-1158
 [3] Sezgin M. A survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 146-165
 [4] Mezaris V, Kompatsiaris I, Strintzis M G. Still image objective segmentation evaluation using ground truth[C]//5th COST 276 Workshop. 2003: 9-14
 [5] Zhang Hui, Fritts J E, Goldman S A. An entropy-based objective evaluation method for image segmentation[C]//Storage and Retrieval Method and Application for Multimedia 2004. Proceedings of the SPIE. 2004, 5307: 38-49
 [6] Gao Y, Kerle N, Mas J F, et al. Optimized image segmentation and its effect on classification accuracy[C]//Proceedings of the 5th International symposium on Spatial Data Quality SDQ 2007. Netherlands: 13-15
 [7] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66
 [8] 刘健庄, 粟文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, 19(1): 101-105
 [9] Jian Gong, Yuan Li Li, Nan Chen Wie. Fast recursive algorithm for two-dimensional thresholding [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(3): 295-300
 [10] 景晓军, 蔡安妮, 孙景鳌. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报, 2001, 22(4): 71-76
 [11] 范九伦, 赵凤, 张雪峰. 三维 Otsu 阈值分割方法的递推算法[J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1398-1402
 [12] Menezes A J, van Oorschot P C, Vanstone S A. 应用密码学手册[M]. 胡磊, 王鹏, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005

1981, 13: 3-16

[4] Pal N R, Pal S K. A review on image segmentation techniques [J]. PR, 1993, 26: 1277-1294
 [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002
 [6] 章毓晋. 图像工程上册图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
 [7] Zhang X G, Liu Y, Wang C X. Filter Design Based on the Theory of the Generalized Morphological Filter with Omni directional Structuring Element[J]. Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel Distributed Computing, 2007, 3: 255-258
 [8] Wang J, Liu P, Liu D C. The Design and Analysis of Improved Adaptive Generalized Morphological Filter[J]. Image and Signal Processing, 2008, 1(27-30): 106-111