

文章编号 1004-924X(2010)08-1869-08

路面病害检测系统中的图像增强技术

张大奇, 曲仕茹, 何 力

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了提高路面病害检测系统的精度和自适应能力, 研究了自动路面裂缝图像增强技术。针对图像每个像素建立由邻域一致性模糊熵测度、邻域模糊方差以及全局模糊隶属度组成的模糊特征模式对所有像素进行分类, 实现对像素灰度跨越点位置的准确估计; 在模糊隶属度函数设计上, 利用修改控制顶点和权因子可局部地修改曲线形状的功能, 通过非均匀有理 B 样条函数设计出一种双“S”形模糊隶属度函数作为灰度变换函数。提出的路面裂缝图像增强技术中的灰度变换函数不仅能和跨越点的位置很好地结合, 而且其形状调节因子具备良好的灰度集中能力, 仅需很少次数迭代增强就能达到突出路面裂纹的效果。实验结果显示, 利用提出的图像增强技术可使路面裂缝病害像素正确检测率达到 95%, 该技术很大程度地提高了路面裂缝自动检测系统的可靠性和检测精度。

关键词: 路面病害检测; CCD 摄像机; 图像增强; 模糊测度; 灰度变换

中图分类号: TP391.4; U416.03 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1869

Application of automatic image enhancing technique to road defect detection systems

ZHANG Da-qi, QU Shi-ru, HE Li

(Department of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to improve precision and adaptive capability of road defect detection system, an image enhancement technique for automatic road defect is investigated. To estimate the crossover points of gray transform, a new 3-D pattern formed with two local features of the neighborhood of each pixel and one global feature based fuzzy measurement is constructed for pixel classification. In design of a fuzzy membership function with image enhancement ability, the Non-uniform Rational B-Splines(NURBS) is used to produce a double S shape fuzzy membership function as the gray transform function. The gray transform function can easily be united with the crossover points perfectly and its designable shape can offer capability of gray level centralization. Therefore, the method can obtain the road crack only by a few operations of iteration and enhancement. Experimental results testify that this adaptive technique can provide satisfactory enhancement effects and the detection accuracy of road crack region pixels reaches 95%. The proposed technique shows better reliability and precision for road defect detection systems.

Key words: detection of road defect; CCD camera; image enhancement; fuzzy measurement; gray transform

收稿日期: 2009-04-09; 修订日期: 2010-02-24.

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划资助项目(No. 2008K07-14)

1 引言

由于传统人眼检测路面病害的方法有很多缺陷,因此,自动路面病害检测系统^[1]的研究受到国内外科研人员的广泛关注。近年来,随着高速数字图像采集技术、大容量存储器及图像处理技术的快速发展,CCD 摄像机在路面病害自动检测技术应用中发挥了越来越重要的作用。受图像采集设备参数、光照条件以及路面自身成像特点等因素的影响,直接对路面裂缝图像进行几何特征(面积、长宽等)提取往往难以得到较好的结果,因此,一般情况下都需要进行图像增强处理。目前,图像对比度增强技术种类很多,但传统的图像滤波增强算子或直方图均衡化增强方法用于路面裂缝图像增强预处理^[2-5]都不能获得令人满意的效果。

图像的边缘、区域、纹理等概念被认为“天然地”存在一定的模糊性,所以模糊集的理论和方法也就自然地引入到图像处理领域中^[6-10],其在路面病害检测系统中的应用中已被证明具有良好的效果^[6-7]。为了进一步提高路面病害检测系统的精度和自适应能力,本文研究了自动路面裂缝图像增强技术。由于在图像模糊增强技术中,像素灰度跨越点位置和模糊隶属度函数的形状非常关键^[11],本文提出的图像增强技术主要根据路面破损图像的特点,选用每个像素所在邻域窗口的邻域一致性模糊熵测度、邻域模糊方差及模糊隶属度值作为特征模式,利用聚类算法对路面病害图像像素进行分类,进而确定灰度跨越点值;最后使用自由曲线设计方法生成用于图像灰度变换的模糊隶属函数。新技术相比其它方法虽然费时,却有更好的图像增强效果。

2 路面病害图像像素分类

在路面病害目标检测中,由于路面图像很复杂,一般认为裂缝等病害是图像中灰度发生突变的点的集合,实际上灰度突变的特点是裂缝和噪声的共性,所以模糊图像增强技术存在去噪和保持裂缝细节折中的问题;对于灰度层次变化丰富的目标区域,需要很好地解决目标区域与背景区域灰度区间重叠的问题^[12]。为了便于像素分类,将路面病害图像分为裂缝区和非裂缝区。裂缝区

一般表现为目标(裂缝)区和过渡(裂缝边缘)区,目标区像素的亮度非常暗而灰度变化均匀;而过渡区像素亮度则较暗、灰度变化不均匀。非裂缝区主要由路面背景和附着在背景上的杂物组成。杂物主要是由不同物质颗粒及相互颗粒间隔等所形成的随机噪声信号,表现为离散的点、斑点或较短的线;背景部分呈现亮度较高、灰度变化均匀的特点;在噪声点处则表现为较亮或者较暗,邻域一致性差的特点,且噪声点周围也存在像素灰度过渡区。根据这些特点选用以下 3 个模糊特征量组成特征模式对路面图像像素进行分类。

2.1 邻域一致性模糊熵测度

设 $F = \{f_{ij}\}_{M \times N}$ 表示一幅尺寸为 $M \times N$ 的数字图像,若其灰度级为 L ,则 $f_{ij} = 2^l (0 \leq l \leq L - 1)$ 。将图像灰度归一化后,按照下式将其映射到一个具有某种特征的模糊集合 $W = \{\omega_{ij}\}_{M \times N}$ 。

$$\omega_{ij} = \omega_k(f_{ij}) = \frac{1}{1 + |f_{ij} - k|/C}, \quad (1)$$

式中: C 为一常量,用来控制 ω_{ij} 的取值范围。显然 ω_{ij} 刻画的是 f_{ij} 与 k 的相似度。然后在模糊集合 W 上定义一个模糊熵

$$H(\omega_{ij}) = -\omega_{ij} \log_2(\omega_{ij}) - (1 - \omega_{ij}) \log_2(1 - \omega_{ij}). \quad (2)$$

为了度量某像素点与其邻域中各点的一致性程度,定义 (i, j) 处像素的一致性模糊熵测度为

$$M_{ij} = M(f_{ij}) = \frac{1}{d^2} \sum_{n=j-d}^{n=j+d} \sum_{m=i-d}^{m=i+d} H(\omega_{nm}(k)), \quad (3)$$

式中: d 为分析窗口的尺度。若令 $k = f_{ij}$,则当窗口中其它点灰度和 (i, j) 处像素灰度越接近时, $M(f_{ij})$ 越小,反之则越大。因此,它能够较好地反映该像素点与邻域内其它像素点的一致性程度。

2.2 邻域模糊方差

将归一化后的图像灰度按照下面的“S”形隶属函数映射到一个模糊集合 $S = \{\mu_{ij}\}_{M \times N}$ 。

$$\mu_{ij} = \mu(f_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha/\beta(f_T - f_{ij})}}, \quad (4)$$

其中: f_T, α, β 为控制参量。 f_T 表示模糊隶属度函数的参照值,一般取为 (i, j) 处像素分析窗内像素的最大灰度级 f_{\max} 。参量 α 用来控制隶属度值在范围 $\rho[0, 1]$ 内,通常取为 2。 α 和 β 共同控制隶属函数曲线拐点的位置。使隶属函数曲线的拐点为分析窗内灰度均值 \bar{f}_{local} 是一个理想方案,此时 $\beta = \alpha / (f_{\max} - \bar{f}_{\text{local}})$ 。为了得到目标和背景之间的

过渡区域,定义 (i, j) 处像素的邻域模糊熵方差为

$$V_{ij} = V(f_{ij}) = \frac{1}{d^2} \sum_{n=j-dm=i-d}^{n=j+dm=i+d} \sum_{m=i-d}^{m=i+d} [H(\mu_{nm}) - \frac{1}{d^2} \sum_{n=j-dm=i-d}^{n=j+dm=i+d} \sum_{m=i-d}^{m=i+d} H(\mu_{nm})]^2. \quad (5)$$

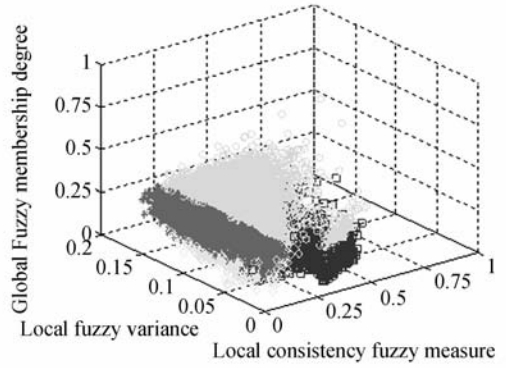
目标(或背景)区域灰度级分布比较集中,具有较小的邻域模糊熵方差,而过渡区灰度级分布比较分散,邻域模糊熵方差较大,由它可区别出过渡区像素。

上述两个数值特征还不能区分灰度级分布均匀的背景和目标,再结合像素模糊隶属度值就可区分。

2.3 全局模糊隶属度

由于一般目标(路面裂缝)像素灰度值较小,而背景像素灰度值相对较高,可以利用一个统一的“S”形模糊隶属度函数将灰度级归一化后的整个图像映射成一个模糊点矩阵,该矩阵反映了灰度图像与某一个二值图像的相似程度。统一的“S”形隶属度函数仍然选用(4)式中所定义的函数,其中参数 f_T 取为全局图像的最大灰度级 I_M , $\alpha=2, \beta=\alpha/(I_M - \bar{f}_{Global}), \bar{f}_{Global}$ 为全局图像灰度平均值。

由上述 3 个数字特征构成模糊特征组合模式对路面病害图像素进行分类。图 1(b)是对图 1(a)中原始路面图像所有像素的模糊特征模式使用 FCM 算法获得的聚类结果。可以看出路面病害图像像素模糊特征模式具有明显的聚类分类特征。图 2 则用不同颜色显示了图 1(a)中图像的像素模糊分类结果。图 2(a)为采用基于邻域一致性模糊熵测度阈值划分法^[11]所得的像素分类结果;图 2(b)为采用新模糊特征模式并结合 FCM 聚类法所获的像素分类结果。对比发现后者可获得更为准确的像素分类结果。

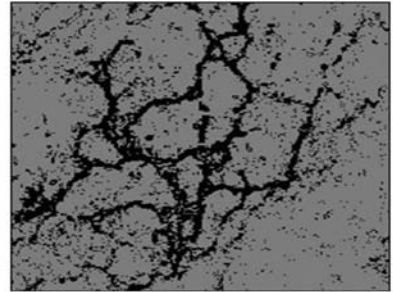


(b)模糊特征组合的聚类结果

(b)Fuzzy pattern clustering results

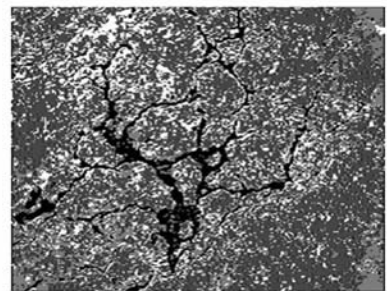
图 1 像素模糊特征组合所呈现的聚类特征

Fig. 1 Clustering feature of pixel fuzzy patterns in cracked image



(a)文献[11]中划分法

(a)Classified image by method in Ref. [11]

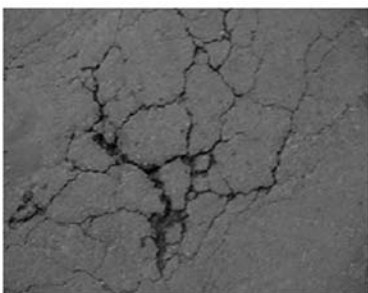


(b)本文模式聚类分类法

(b)Classified image by our pattern clustering

图 2 不同方法所得的像素分类结果

Fig. 2 Pixel classification results using different methods



(a)原始图像

(a)Original image

3 模糊隶属函数的设计

当整幅图像被分成不同的图像区域后,每个区域都有一个灰度中心值 $x_i (i=1, 2, \dots, N), N$

为灰度中心的个数。数值上大小相邻的两个灰度中心的算术平均值为渡越点,记为 $x_c = (x_i + x_j)/2$ 。

为了便于对不同类别像素所在的图像区域进行识别,可以利用“S”形模糊隶属函数对像素灰度进行集中化处理。在灰度中心值 x_i 和 x_j 之间局部地定义一个“S”形函数;该函数曲线上的拐点位于渡越点 x_c 处,拐点的纵坐标(隶属度值)可使其等于 x_c ,也可根据实际需要由经验指定。此处的图像灰度级都是经过归一化到 $[0, 1]$ 区间的灰度值。

计算机辅助几何设计中的 NURBS 方法^[13]是目前定义工业产品几何外形的惟一数学描述方法。

p 次 NURBS 曲线的定义为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i}, 0 \leq u \leq 1, \quad (6)$$

这里 $\{P_i \in E^3\}$ 是控制点(形成一个控制多边形), $\{N_{i,p}(u)\}$ 是 p 次的 B 样条基函数。NURBS 基函数的局部支撑性决定了其具有局部逼近性,因而曲线形状可以由控制顶点和权因子局部地控制修改;另外,整个曲线还可以分段的定义和设计。因此选择使用该曲线造型方法设计生成图像灰度变换函数。

由两段 3 次 NURBS 曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ 设计生成“S”形隶属函数的详细过程为

将 $C_1(u)$ 中参数取为: $p=3; m=4$;

$$U_1 = \{0, 0, 0, 0, 1/2 - \delta, 1/2, 1/2 + \delta, 1, 1, 1, 1\};$$

$$P_1 = \{(0, 0); (0, 0, 1); (0.2, 0.1); (0.9, 0.1); (1, 1); (0, 0); (0, 0)\}; w_1 = \{1, 1, 1, \alpha_1, 1, 1, 1\}; u \in [1/2 - \delta, 1/2].$$

将 $C_2(u)$ 中参数取为: $p=3; m=5$; 节点向量

$$U_2 \text{ 同 } U_1;$$

$$P_2 = \{(0, 0); (0, 0); (0, 0); (0, 0); (0.1, 0.9);$$

$$(0.8, 0.9); (1, 0.9); (0, 0)\}, w_2 = \{1, 1, \alpha_2, 1, 1, 1, 1\}; u \in [1/2, 1/2 + \delta].$$

图 3 中显示的是 $\delta=0.3$, 权因子 α (这里取因子 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$) 取值沿箭头方向不断变大得到的“S”形隶属函数图像。

为了更加准确地描述不同类别像素对裂缝“突出”增强的贡献,得到较为准确和平滑的裂缝区域。本文拟用双“S”形模糊隶属函数进行图像

增强。双“S”形模糊隶属函数的特征是在它的函数图像上有 3 个拐点,拐点两侧的图像凹向相反。假设双“S”形隶属函数的定义域为 $[0, 1]$ 区间, 3 个拐点坐标分别为 $(0.3, 0.5)$, $(0.5, 0.8)$ 和 $(0.8, 0.9)$, 该函数图像可由区间 $[0, 0.5]$ 和 $[0.5, 1]$ 上定义两个“S”形函数来实现,所用的“S”形函数的生成参数如前所示。图 4 显示的是最终生成的双“S”形模糊隶属函数图像。

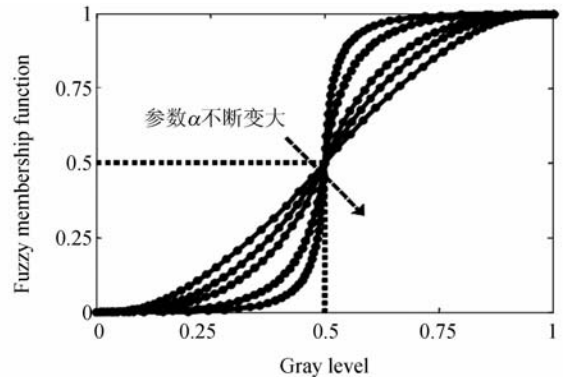


图 3 形状调节参数 α 变化下的“S”形隶属函数曲线
Fig. 3 S-shape fuzzy membership functions with parameter α

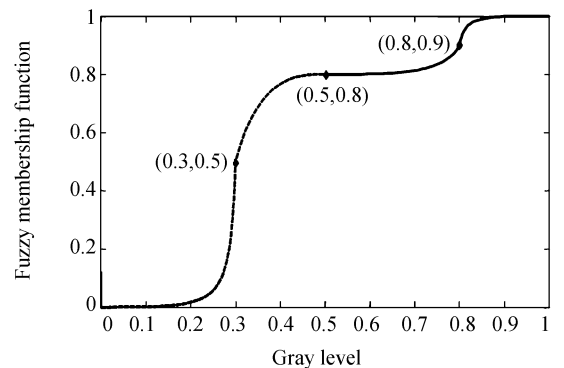


图 4 双“S”形模糊隶属函数曲线

Fig. 4 Double-S-shape fuzzy membership function

4 路面病害图像增强技术实现算法

裂纹病害路面模糊图像增强算法^[7,11]主要分为 3 步:准确的像素分类、具有图像增强作用模糊隶属函数的设计和图像模糊增强。具体算法步骤如下:

Step1. 输入路面图像并归一化,记为图像 $F_{M \times N}$ 。

Step2. 按照第 2 节定义求解图像 $F_{M \times N}$ 所有

像素的模式向量 $\{(M, V, W)_{ij}\}_{M \times N}$ 。

Step3. 利用 FCM 模糊聚类算法将像素分成 4 类;并求解每类像素的灰度中心,经过由低到高排序得 (x_0, x_1, x_2, x_3) ;选取渡越点: $x_{C_0} = (x_0 + x_1)/2, x_{C_1} = x_1$ 和 $x_{C_2} = (x_1 + x_2)/2$ 。

Step4. 在区间 $[0, x_1]$ 和 $[x_1, 1]$ 之间利用第 3 节方法生成两个“S”形隶属函数,3 个拐点分别取为 $(x_{C_0}, \lambda_{Low}), (x_{C_1}, \lambda_{Median})$ 和 $(x_{C_2}, \lambda_{High})$, 形成一个完整的双“S”形模糊隶属函数 $y = \mu(x)$ 。

Step5. 利用上述模糊隶属函数 $y = \mu(x)$ 作用到病害路面图像 $F_{M \times N}$ 上便得到增强后的路面图像 $G_{M \times N}$ 。

在以上的算法描述中,第 3 步中经过排序后, x_0 和 x_1 表示裂纹线上点和较暗的杂质点的灰度均值, x_2 表示灰度过渡区灰度中心值, x_3 表示背景像素和较亮杂质点的灰度均值。因此用 x_1 作为两个“S”形隶属函数的分界点,最终构造的模糊隶属函数 $y = \mu(x)$ 图像有 3 个拐点,该隶属函数能够起到按照要求达到灰度集中的目的。在第 4 步中,修改 λ_{Low} 和 λ_{High} 的值可以调节图像增强效果,通过对大量的路面破损照片使用该图像增强算法和反复试验之后发现,参数 $\lambda_{Low} = 0.2, \lambda_{Median} = 0.8$ 和 $\lambda_{High} = 0.9$ 就可满足要求。一般地,使用这类隶属函数的计算结果最后还需要迭代增强函数作用才能得到满意的效果, Pal-King 给的迭代增强函数^[6]如(7)式所示。

$$\mu(x) = E_r[\mu(x)] = E_1[E_{r-1}\mu(x)], (r=1, 2, \dots)$$

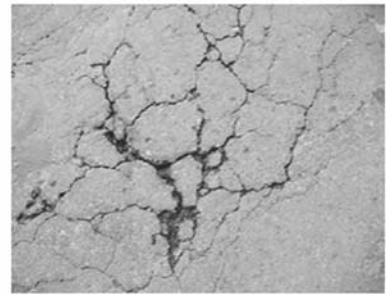
$$E[\mu(x)] = \begin{cases} 2\mu(x), & 0 \leq \mu(x) \leq 0.5 \\ 1 - 2[1 - \mu(x)]^2, & 0.5 \leq \mu(x) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

5 实验结果与分析

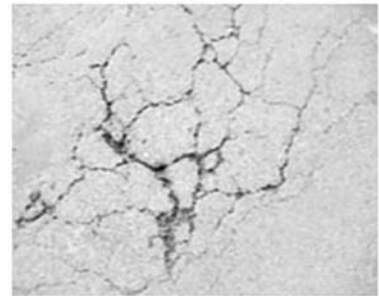
利用上述路面病害图像增强算法对图 1(a) 中的原始路面裂缝图像进行增强处理。不同图像增强技术所获得的结果见图 5 所示。图 6 所示为对以上增强后图像再次施行迭代函数作用的结果,分别经历的迭代次数为 r 。表 1 和表 2 给出的是不同图像增强技术获得的路面裂缝病害像素的正确检测率及其实现算法在 Matlab7.0 编译环境下的运行时间。



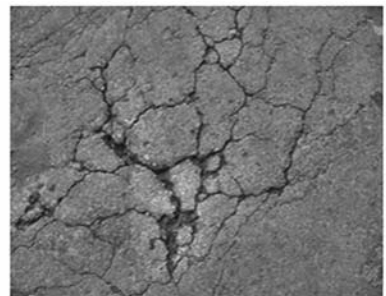
(a) 本文方法
(a) Our method



(b) 文献[11]的方法
(b) Method in Ref. [11]



(c) 同态滤波 ($N=2, d_0=50$)
(c) Homostasis filtering



(d) 直方图均衡化
(d) Histogram equalization

图 5 不同方法的图像增强结果

Fig. 5 Image enhancement results by different methods

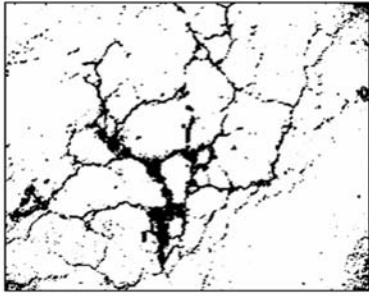
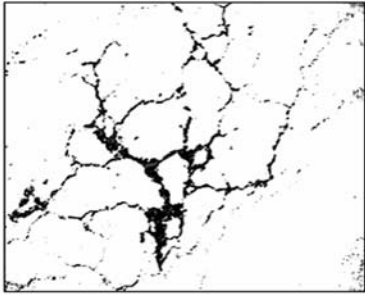
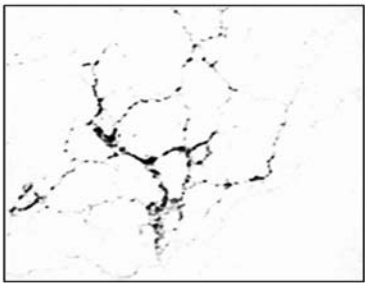
(a) $r=1$ (b) $r=2$ (c) $r=2$ (d) $r=3$

图 6 迭代函数额外作用的结果

Fig. 6 Added enhancement results by iteration function

表 1 路面裂缝病害像素正确检测率

Tab. 1 Detection accuracy of road crack pixels

	新方法	同态滤波	方法一 ^[6]	方法二 ^[11]
正确检测率	95%	52%	63%	87%

表 2 不同图像增强方法算法运行时间(单位:s)

Tab. 2 Running time of different image enhancement methods

	新方法	同态滤波	方法一 ^[6]	方法二 ^[11]
耗费时间	67.82	2.97	6.66	16.85

由图 5 中不同方法的图像增强效果可以得知,新的图像模糊增强技术能使处于裂缝边缘这种过渡区域的像素在归属权上更加有效地分离。因此,该技术不仅能够非常显著地突出裂缝区域像素,还能较大程度地减少噪声影响使图像背景显得更加平滑。由表 1 中的结果可知,新的图像增强技术相对于其它几种方法能使增强后的图像更加有利于精确地统计出裂缝区域的像素面积。表 2 中显示新技术的缺点是算法运行较为费时,主要耗费在像素模糊分类和模糊隶属函数曲线的设计生成上。其中文献[11]没有说明像素分类时基于邻域一致性模糊熵的阈值法中两个阈值的选取原则,此处比较时利用邻域一致性模糊熵测度直方图的峰值进行确定。

6 结 论

为了使路面图像增强技术具备自适应能力,考虑了图像灰度变换中渡越点位置的估计和模糊隶属函数的形状所起的重要作用。在分析了路面裂缝病害图像特点的基础上,提出由邻域一致性模糊熵、邻域模糊熵方差和全局模糊隶属度构成三维像素特征分类模式,实现对路面裂缝病害图像像素较好分类,从而解决了灰度渡越点位置自动计算的问题;又利用非均匀有理 B 样条方法设计了一种双“S”形模糊隶属函数,从而使它具备很好的图像灰度集中能力。实验结果表明,本文所给的自适应路面图像模糊图像增强技术能够获得较好图像增强效果,通过它可使路面裂缝区域像素的正确检测率能达 95%。新技术的算法运行虽然较为耗时,但是,一般路面图像的处理目前仍是采用离线处理的方式,因此新技术中算法的运行效率还是可以接受的。所给自适应模糊图像

增强技术为下一步开发先进路面病害自动检测系

统做好了部分准备工作。

参考文献:

- [1] WANG K C P. Designs and implementations of automated systems for pavement surface distress survey[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2000, 6(1):24-32.
- [2] LI L, CHAN P, LYTTON R L. Images detection of thin cracks on noisy pavement[J]. *Transportation Research Record*, 1991,1311:131-135.
- [3] 蒋彬,刘淑荣. 基于图象识别的公路路面破损自动检测研究进展[J]. 东北公路, 2002,25(3):19-21.
- JIANG B, LIU SH R. Development of research on pavement distress automatic inspection based on image identify[J]. *Northeastern Highway*, 2002, 25(3):19-21. (in Chinese)
- [4] CHOU J C, O'NEIL W A. Pavement distress evaluation using fuzzifying logic and moment invariants [R]. *Transportation Research Record*, 1505, *Transportation Research Board, Washington D C*: 144-148.
- [5] 王荣本,王超,初秀民. 路面破损图像识别研究进展[J]. 吉林大学学报(工学版), 2002,32(4):91-96.
- WANG R B, WANG CH, CHU X M. Developments of research on road pavement surface distress image recognition[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2002, 32(4):91-96. (in Chinese)
- [6] PAL S K, KING R A. Image enhancement using fuzzy sets[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(9): 376-378.
- [7] CHENG H D, CHEN J R, GLAZIER C, *et al.* Novel approach to pavement distress detection based on fuzzy set theory[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1999, 13(4):270-280. (in Chinese)
- [8] 李仕,张葆,孙辉. 航空多重模糊图像的恢复[J]. 光学精密工程, 2009,17(5):1161-1170.
- LI SH, ZHANG B, SUN H. Restoration of aerial multiple blurred images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):1161-1170.
- [9] 张坤华,杨但. 应用聚类和分形实现复杂背景下的扩展目标分割[J]. 光学精密工程, 2009,17(7): 1665-1671.
- ZHANG K H, YANG D. Segmentation for extended target in complex backgrounds based on clustering and fractal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1665-1671. (in Chinese)
- [10] 陈平,潘晋孝,刘宾. CT图像边缘退化模型的建立及其在图像尺寸测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2009,17(9):2269-2275.
- CHEN P, PAN J X, LIU B. Computed tomography image edge degradation model and its application to image size measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2269-2275. (in Chinese)
- [11] 唐磊,赵春霞,王鸿南,等. 一种自适应路面图像模糊增强算法[J]. 光子学报, 2007,36(10):1943-1948.
- TANG L, ZHAO CH X, WANG H N, *et al.* An adaptive fuzzy enhancement algorithm for road surface images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(10):1943-1948. (in Chinese)
- [12] 乐宁,梁学军,翁世修. 图像过渡区算法及其改进[J]. 红外与毫米波学报, 2001,20(3):211-214.
- LE N, LIANG X J, WENG SH X. The algorithm of image transition region and its improvement[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(3):211-214. (in Chinese)
- [13] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- SHI F ZH. *CAGD & NURBS* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:



张新奇(1976—),男,陕西富平人,博士研究生,主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: dqzhang2005@yahoo.com.cn



何力(1983—),男,山东济南人,博士研究生,主要从事智能交通,模式识别及图像处理方面的研究。E-mail: he-li1128@sina.com

导师简介:



曲仕茹(1963—),女,山东青岛人,教授,博士生导师,主要从事自动控制与智能信息处理等方面的研究。E-mail: shiruqu@nwpu.edu.cn

● 下期预告

高陡度保形光学镜面坐标测量迭代算法

贾立德

(中国酒泉卫星发射中心,甘肃 兰州 732750)

在超精密加工与检测技术中,高陡度保形光学镜面的检测方法一直是一个研究重点。本文建立了基于多段拼接的高陡度保形光学镜面坐标测量方法。它将保形光学镜面轮廓的测量分割为具有一定重叠区域的数段较短面形轮廓的测量,通过测量系统与被测工件之间的相对旋转与平移运动调整被测工件的姿态实现分段轮廓的测量。之后通过拼接算法将各段面形轮廓拼接起来,重构出被测工件的面形误差。在建立了的基于多段拼接的高陡度保形光学镜面坐标测量方法的数学模型基础上,提出了基于最小二乘的迭代拼接算法,并在 Matlab 下对测量算法进行了仿真。在开发了高精度的测量试验系统并分别在 VC 与 Matlab 下编写了测控软件与数据分析软件的基础上,对一口径 120 mm,长径比 1.2 的椭球形保形头罩进行了实测试验。仿真与测量试验表明:上述方法能够高精度的重构出面形轮廓,方法简单,实用。