

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.007



频域滤波的水泥路面图像降噪增强方法

张宏^{1,2}, 英红³

(1. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古自治区桥梁检测与维修加固工程技术研究中心, 呼和浩特 010070; 3. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要:针对在水泥路面裂缝图像识别中刻槽和纵向条带状形成的噪声干扰,提出了一种基于频域滤波的降噪增强方法。首先,分析了这两类噪声的频谱特征,并根据空域图像中刻槽的周期性,推导了频域图像中刻槽谱峰的位置,设计了消除这些谱峰的一系列滤波器。根据纵向条带状干扰属于低频成分的特性,设计了抑制低频、增强高频的滤波器,经优化滤波器参数达到消除这类干扰的效果。实验结果表明,该方法能够消除两类噪声干扰,同时,增强了裂缝的对比度,为水泥路面裂缝识别提供了理论基础。

关键词:水泥路面;裂缝识别;数字图像处理;频域滤波;降噪

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)03-0048-05

Denoising and enhancing method in cement pavement image based on frequency domain filter

Zhang Hong^{1,2}, Ying Hong³

(1. Transportation Institute of Inner Mongolia University, Huhehot 010070, P. R. China; 2. The Engineering Research Center of Bridge Inspection and Maintenance and Reinforcement of Inner Mongolia, Huhehot 010070, P. R. China; 3. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China)

Abstract: A denoising and enhancing method based on frequency domain filter was developed aiming at two main noise in cement pavement image: groove noise and longitudinal stripe noise. Firstly, the spectral features of the two kinds of noise were analyzed. On this basis, the position of groove spectral peaks in the frequency domain were deduced according to the groove period in spatial domain. Then, a series of filters were designed to eliminate these peaks in the frequency domain. Moreover, aiming at the longitudinal stripe noise belonging to the low frequency components, a filter of which parameters were optimized through experiments, was designed to eliminate this disturbance by suppressing low frequency and enhancing high

收稿日期:2014-12-30

基金项目:国家自然科学基金(51208130, 51468047); 广西自然科学基金(2013GXNSFBA019258); 内蒙古自然科学基金(2013MS0703); 内蒙古教育厅科学研究项目(NJZY13018, NJZY13016)

作者简介:张宏(1978-),男,副教授,博士,主要从事岩土工程与道路工程研究,(E-mail)zhanghong3537@126.com。

英红(1978-),男,副教授,博士,(E-mail)yinghongcq@tom.com。

Received:2014-12-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(51208130, 51468047); Natural Science Foundation of Guang Xi(2013GXNSFBA019258); Natural Science Foundation of Inner Mongolia(2013MS0703); Science Research Projects of Education Department of Inner Mongolia(NJZY13018, NJZY13016)

Author brief: Zhang Hong(1978-), associate Professor, PhD, main research interest teaching and researching of geotechnical engineering and road engineering,(E-mail)zhanghong3537@126.com.

Ying Hong(1978-), associate Professor, PhD,(E-mail)yinghongcq@tom.com.

frequency. Finally, the experimental results showed that this proposed method can eliminate the two kinds of noise and enhance the contrast of cracks, which provided a foundation for crack recognition in cement pavement.

Key words: cement pavement; crack recognition; digital image processing; frequency domain filtering; denoise

使用数字图像处理技术识别路面的各种裂缝,具有准确、快速、客观、可追溯等优点,是当前道路管理和养护的研究热点^[1-6]。水泥路面图像的裂缝自动识别技术由于强噪声干扰,仍未能实用化,水泥路面刻槽和纵向条带状干扰是两类普遍存在的噪声^[7]。

刻槽为非常密集的具有较强边缘特征的水平直线,它的宽度和灰度与裂缝相近,当与其他噪声混杂后,很难将裂缝从密集的刻槽中提取出来。文献[8]使用 Canny 算法将刻槽和裂缝的交叠图像识别出来,然后,根据刻槽的直线特征使用 Hough 变换^[9]对刻槽加以剔除,最后得到裂缝片段图像,但由于裂缝片段过小,易与其他噪声混淆;文献[10]使用二维小波变换对高频水平子图中的刻槽进行抑制,达到弱化刻槽的目的,但此法同时弱化了横向裂缝;此外,带方向增强的 LoG 在抑制刻槽的同时也存在弱化横向裂缝的问题^[11]。而使用水平投影的一维小波变换方法^[12],虽然运算速度快,但对刻槽存在偏角的情况则无能为力。

纵向条带状干扰是由长期行车路面磨损、轮迹污染等因素造成的,它是一种背景灰度不均匀的表现,由于亮区与暗区的裂缝对比度具有较大差异,造成了暗区裂缝漏识、亮区裂缝误识的问题。在消除不均匀的背景方面,文献[13]使用分块直方图均衡的方法,但该方法在区块边界处易引入新的噪声,区块大小选择不当,甚至会加剧背景的不均匀程度。文献[14]使用背景建模的方法,此类算法认为路段在相当长的范围内,背景不均匀程度是相似的,通过该路段图像各区域的灰度平均值对暗区进行增亮,对亮区进行减暗,但此类算法在对明暗区域进行灰度补偿时,裂缝的灰度也随之变化,并未改善裂缝与背景的对比如。

针对刻槽存在的周期性,且纵向条带状干扰在频域图像中为低频成分,从水泥路面图像的频域特征入手,对刻槽在频域中呈现的谱峰位置进行推导,通过设计系列滤波器消除刻槽谱峰,同时采用抑制低频,增强高频的滤波器起到压缩灰度的波动范围、增强裂缝细节的作用,最终达到消除两类干扰的

目的。

1 水泥路面图像的频域特征

对尺寸为 $M \times N$ 的图像函数 $g(x, y)$ 进行离散傅立叶变换:

$$G(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (1)$$

同样,给出 $G(u, v)$, 可通过傅立叶反变换得到原函数

$$g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} G(u, v) e^{j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (2)$$

图像的功率谱为

$$P(u, v) = |G(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (3)$$

式中: $R(u, v)$ 和 $I(u, v)$ 分别为 $G(u, v)$ 的实部和虚部。

在处理时,往往要对原始输入图像乘以 $(-1)^{(x+y)}$, 从而使功率谱的原点位于图像中心位置。图 1 为一副水泥混凝土路面的截图,图 2 为它的功率谱图像。从功率谱图中可以看出,功率谱是奇对称的,靠近原点的部分为原始图像的低频成分,对应图像中的背景部分,主要能量集中在了原点附近;远离原点的部分为高频成分,对应图像中裂缝、刻槽。

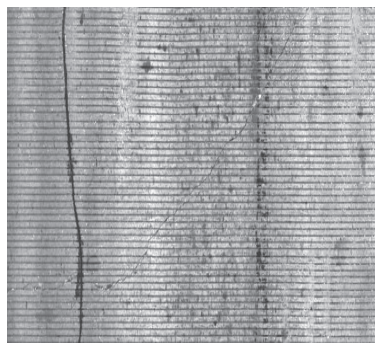


图 1 水泥混凝土路面图像

Fig. 1 Picture of cement concrete pavement

如图 1 所示,水泥路面图像中含有 1 条纵向的修补裂缝和 1 条斜向的新生裂缝:修补裂缝较宽,与背景对比度较大,识别难度较低;新生裂缝宽度很小,一般小于刻槽的宽度,它与背景的对比如较小,对此类裂缝识别是非常困难的。图像中存在密集的

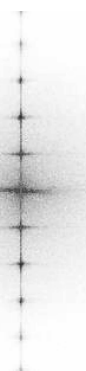


图 2 功率谱

Fig. 2 Power spectrum

刻槽,它在图像中表现为一条条等间距的横向直线;此外,图像中还存在着纵向条带状干扰,将图像分为一条条纵向分布且明暗相间的条带区域,进一步观察,新生裂缝在亮区的对比度较大,而在暗区中的对比度则不明显。因此,在对图 1 中的裂缝进行识别,尤其是对新生裂缝识别时,必须消除刻槽和纵向条带状干扰这两类噪声。

水泥路面的刻槽,由于受建设过程中统一的规范标准的约束,宽度和间距在某个路段上是大致固定的,刻槽在路面图像中近似为贯穿整个图像的水平直线,这些刻槽等间距的排列,灰度变化范围基本相同,在垂直方向上有明显的周期性。从图 2 的功率谱中可以看出,靠近 v 轴附近,存在一些等间距的谱峰,排列成为 1 条直线,靠近原点的谱峰能量交大,随着远离原点,谱峰能量逐步衰减,这些周期出现的谱峰就是刻槽周期性的体现。针对这个特点,可设计一系列的陷波滤波器在原图像的频域中依次消除 v 轴附近周期性谱峰,通过反变换得到无刻槽的路面图像。

纵向条带状干扰的周期性并不明显,它的干扰区域宽度较大,且灰度变化较缓慢,可将此类干扰看作作为不均匀背景,它主要存在于频域图像的低频部分,可设计同态滤波器抑制频域中的低频成分,增强频域中的高频部分,通过频域图像的反变换,得到不均匀背景下的裂缝增强效果。

2 二维傅立叶变换刻槽消除

2.1 频域图像中刻槽谱峰的位置

频域滤波是典型的周期性的条纹干扰去除方法^[15],难点在于周期性条纹对应的频谱峰值的确定,水泥路面刻槽在垂直方向上的周期性可以简化为一维序列进行分析,路面灰度序列 $f(n)$ 表示为:

$$f(n) = \sum_c [f_1(n - cT) + f_2(n - cT)], n =$$

$$0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中: $f_1(n) = \begin{cases} A, n = 0, 1, \dots, p-1 \\ 0, n = p, p+1, \dots, N-1 \end{cases}$ 表示刻槽灰度序列,刻槽宽度为 p ,灰度为 A , N 为序列的长度;

$f_2(n) = \begin{cases} B, n = p, p+1, \dots, p+q-1 \\ 0, n = p+q, p+q, \dots, N-1 \end{cases}$ 表示刻槽间隔灰度序列,刻槽间隔为 q ,灰度为 B ; T 为刻槽和刻槽间隔形成的灰度变化周期, $T = p + q$; $f(n)$ 为 $f_1(n)$ 和 $f_2(n)$ 以 T 为周期进行延拓并截断的结果,即循环位移之后的叠加,因此对 $f(n)$ 做 N 点的离散傅立叶变换,根据离散傅立叶时域循环位移性质,可以得到路面灰度序列的幅值 $F(k)$:

$$|F(k)| = \left| \sum_c [F_1(k - cT) + F_2(k - cT)] \right| = \left| \frac{\sum_c W_N^{kcT}}{\sin(\frac{\pi k}{N})} \left| A \sin(\frac{\pi kp}{N}) + BW_N^{kT} \sin(\frac{\pi kq}{N}) \right| \right|, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

式中: $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$; 当 $\sum_c W_N^{kcT}$ 各项取值为 1 时, $|F(k)|$ 有明显的谱峰,谱峰的位置为 v 轴 $k = N/T$ 及其倍频 $(0, ik)$ 处,由于路面刻槽可能与水平轴存在一个较小的夹角 a ,二维路面频域图像中刻槽谱峰的位置在 $(iktga, ik)$ 处,通常夹角 a 小于 15° ,因此可搜索 v 轴 ik 附近水平区域 $[-0.27ik, 0.27ik]$ 寻找谱峰,得到谱峰位置 (u_i, v_i) , i 的最大取值由图像的高度 N 和刻槽间距 T 决定,一般取 10 个谱峰就能消除刻槽的影响,即 i 最大取 10 即可。

2.2 刻槽的消除

找到谱峰位置 (u_i, v_i) 后,可设计系列滤波器 H_i 对谱峰附近区域进行抑制,达到消除谱峰的目的,系列滤波器如下:

$$H_i(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0^2}{D_i^2(u, v)} \right]^2}, & D_i(u, v) \neq 0 \\ 0, & D_i(u, v) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$D_i(u, v) = [(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2]^{\frac{1}{2}}$$

使用传递函数 $H_i(u, v)$ 的滤波器对 $G(u, v)$ 进行滤波,得到

$$K(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i(u, v) G(u, v) \quad (7)$$

式中: $K(u, v)$ 是滤波后的结果; n 为谱峰个数,对其进行傅里叶反变换得到无刻槽的路面图像(图 3),原路面图像中的刻槽消失了,而纵向的修补裂缝和斜向的新生裂缝得以保留。

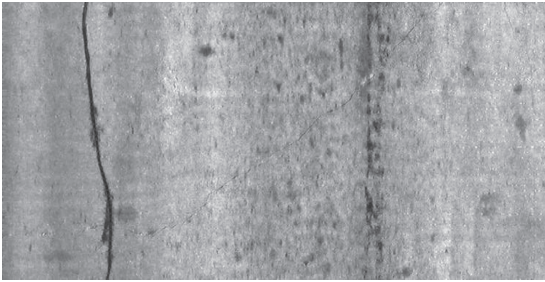


图 3 刻槽消除效果

Fig. 3 Elimination effect of groove

3 纵向条带状干扰区域的降噪增强

轮迹造成的路面背景明暗不均, 细微裂缝在亮区和暗区的对比度差异较大, 对于这种情况, 在空域中较难利用全局类算法进行识别。考虑到水泥路面图像的不均匀背景在空域中变化缓慢, 为低频部分, 而裂缝处的灰度变化剧烈, 为高频部分, 可以通过频域滤波处理, 抑制低频部分, 放大高频部分, 从而实现细微裂缝的增强, 这种方法在增强暗区裂缝细节时, 不会损失亮区的裂缝细节。由此设计一个滤波器 $H_t(u, v)$ 分别控制低频分量和高频分量, 滤波器形式如下:

$$H_t(u, v) = (\alpha_H - \alpha_L) \left[1 - e^{-c \left(\frac{D^2(u, v)}{D_0^2} \right)} \right] + \alpha_L \quad (8)$$

式中: c 为常数, 它使 $H(u, v)$ 在 α_L 与 α_H 之间过渡, 控制滤波函数斜面的锐化程度; D_0 表示截止频率, $D(u, v)$ 为 (u, v) 距离频率中心的距离。

使用传递函数 $H_t(u, v)$ 的滤波器对上节消除刻槽谱峰后的滤波结果 $K(u, v)$ 进行再次滤波, 得到

$$S(u, v) = H_t(u, v) K(u, v) \quad (9)$$

式中: $S(u, v)$ 是滤波后的结果, 对其进行傅里叶反变换得到裂缝的增强图像。

$H_t(u, v)$ 滤波器减弱低频, 增强高频, 起到压缩灰度的波动范围和增强细节对比度的目的。从其实

现过程可以看出, 参数 α_L 、 α_H 、 D_0 和 c 的取值是增强效果好坏的决定因素, 这些参数需要通过多次试验得到, 以 c 参数选择为例加以说明, 取 $\alpha_L = 0.8$, $\alpha_H = 2.5$, $D_0 = 50$, 变化 c , 图 4 的纵向条带状干扰已经弱化, 而竖向的修补裂缝和斜向的新生裂缝, 随着 c 值增加, 对比度越来越高, 图中的裂缝越来越清晰, 但在增强裂缝的同时, 噪声也得到了增强, 综合比较, c 取 2.0 时效果最好。通过大量图像的对比实验, 推荐 α_L 取 0.8, α_H 取 2.5, D_0 取 50, c 为 2.0。

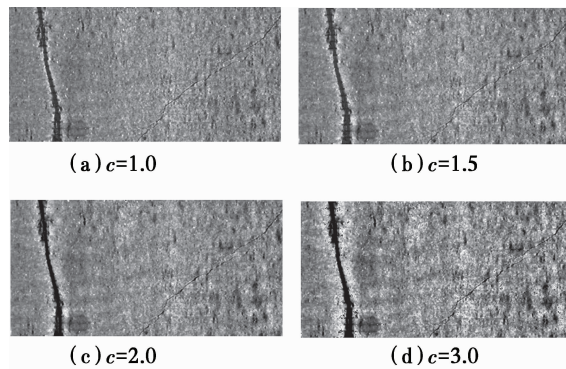


图 4 $H_t(u, v)$ 滤波参数 c 的选择

Fig. 4 The choice of $H_t(u, v)$ filter parameter c

4 算法流程

针对水泥路面图像中刻槽和纵向条带状干扰, 利用其频域特征。第一步, 利用式(1)对原始图像进行傅立叶变换, 得到其频域图像 $G(u, v)$; 第二步, 在 $G(u, v)$ 中的 v 轴 N/T 及其倍频处附近, 搜索得到刻槽形成的谱峰系列位置 (u_i, v_i) , 使用系列滤波器 $H_i(u, v)$ 按式(7)对 $G(u, v)$ 进行滤波, 消除刻槽谱峰, 得到频域图像 $K(u, v)$; 第三步, 使用传递函数 $H_t(u, v)$ 对 $K(u, v)$ 按式(9)进行再次滤波, 消除纵向条带状干扰, 得到频域图像 $S(u, v)$; 最后, 由式(2)将 $S(u, v)$ 反变换为空域图像, 得到最终的降噪增强图像。

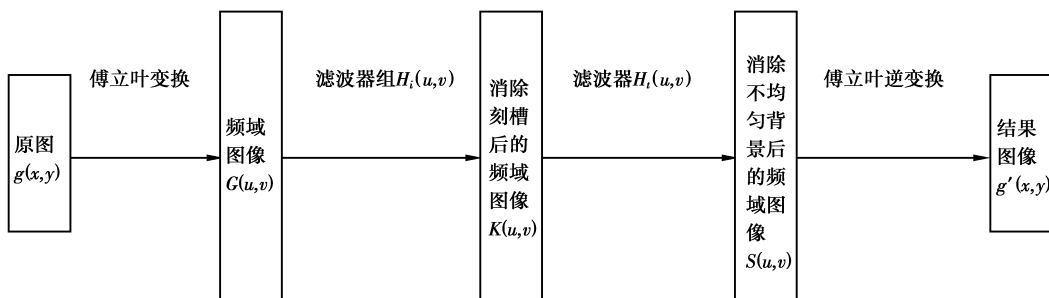


图 5 算法流程图

Fig. 5 Flow diagram of algorithm

5 结论

1) 水泥路面图像中的刻槽和纵向条带状干扰是影响裂缝识别的两类主要因素,刻槽的周期性在频域图像中表现为一系列等间距呈直线排布的谱峰,谱峰位置在 v 轴 N/T 及其倍频处附近;纵向条带状干扰,灰度变化缓慢,属于低频成分,存在于频域图像的原点附近。

2) 针对刻槽频域特征,设计了系列滤波器 $H_i(u, v)$,在频域中消除刻槽的周期性谱峰,实现了水泥路面图像中刻槽的消除。

3) 针对纵向条带状干扰,通过滤波器 $H_i(u, v)$,抑制低频,增强高频,消除了此类干扰的影响,同时增强了裂缝的对比度,实现了不均匀背景下水泥路面图像降噪增强的目的。

参考文献:

[1] Koutsopoulos H N, Downey A B. Primitive-based classification of pavement cracking images [J]. Journal of Transportation Engineering, 1993, 19(3):136-143.

[2] Koutsopoulos H N, Sanhoury I E, Downey A B. Analysis of segmentation algorithms for pavement distress images [J]. Journal of Transportation Engineering, 1993, 116(6): 868-873.

[3] Cheng H D, Miyojim M. Automatic pavement distress detection system [J]. Journal of Information Sciences, 1998, 108(1/2/3/4):219-204.

[4] Huang Y, Xu B. Automatic inspection of pavement cracking distress [J]. Journal of Electronic Imaging, 2006, 15(1): 13017-13023.

[5] Tsai Y C, Kaul V, Mersereau R M. Critical assessment of pavement distress segmentation methods [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 2010, 136(1): 11-19.

[6] Alekseychuk O. Detection of crack-like indications in digital radiography by global optimization of a probabilistic estimation function [D]. Berlin: BAM, 2006.

[7] 英红. 水泥混凝土路面裂缝、填缝料及错台检测方法研

究[D]. 上海:同济大学,2011.

- [8] 荣婧,潘玉利. 基于图像的水泥刻槽路面裂缝识别方法[J]. 公路交通科技,2012,29(3):45-50.
- Rong J, Pan Y L. Digital image based crack detection of grooved cement concrete pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(3): 45-50. (in Chinese)
- [9] Skingley J, Rye A J. The hough transform applied to SAR images for thin line detection [J]. Pattern Recognition Letters, 1987, 6(1): 61-67.
- [10] 荣婧,潘玉利. 基于图像的水泥路面裂缝识别方法及应用[J]. 北京邮电大学学报,2012,35(6):121-124.
- Rong J, Pan Y L. Image based crack detection algorithm with application to cement concrete pavement [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(6): 121-124. (in Chinese)
- [11] 关斌. 一种改进的自适应各向异性 LoG 算子[J]. 科学技术与工程,2010,10(12):2992-2996.
- Guan B. Improved self-adaptable anisotropic laplacian of gaussian operator [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(12): 2992-2996. (in Chinese)
- [12] 常威威. 高光谱图像条带噪声消除方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
- [13] 肖靖. 道路裂缝识别算法研究[D]. 北京:北京邮电大学,2009.
- [14] Li L, Sun L J, Tan S G. An efficient way in image preprocessing for pavement crack images [C]//The twelfth COTA international conference of transportation professionals. Beijing: American Society of Civil Engineers, 2012: 3095-3103.
- [15] 杨雪,马俊,赖积保,等. 基于傅立叶变换的 HY-1B 卫星影像条带噪声去除[J]. 航天返回与遥感,2012,33(1): 53-60.
- Yang X, Ma J, La J B, et al. Destriping methods for HY-1B satellite images based on Fourier transform [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(1): 53-60. (in Chinese)

(编辑 郭 飞)