



引用格式: 裘国永, 李丽, 李良福, 等. 基于自适应亮度高程模型的路面阴影消除算法研究[J]. 轻工学报, 2018, 33(1): 79-87.

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1553.2018.01.010

文章编号: 2096-1553(2018)01-0079-09

# 基于自适应亮度高程模型的路面阴影消除算法研究

Research on road shadow removal algorithm based on adaptive brightness elevation model

裘国永, 李丽, 李良福, 马卫飞

QIU Guoyong, LI Li, LI Liangfu, MA Weifei

陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710119

School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

## 关键词:

自适应亮度高程模型; 阴影消除; 最大熵阈值分割; 亮度补偿

## Key words:

adaptive brightness elevation model;  
shadow removal;  
maximum entropy threshold segmentation;  
luminance compensation

**摘要:** 针对亮度高程模型的阴影消除算法 GSR 的关键参数需要手动设置、亮度等高区域的划分和亮度补偿方法也都存在严重缺陷的问题, 提出一种基于自适应亮度高程模型的路面阴影消除算法 SGRSR: 首先, 采用形态学膨胀运算和高斯平滑滤波消除路面裂缝和路面纹理对后续阴影区域划分的影响; 然后, 利用最大熵阈值分割求解出高斯平滑后路面影像阴影区域和非阴影区域的划分阈值, 以此实现划分阈值的自适应确定; 最后, 基于改进的亮度等高区域划分模型和亮度补偿方法, 实现路面阴影的消除. 实验结果表明, 与 GSR 算法相比, 本算法不仅能够对路面阴影影像进行自动的阴影消除, 而且在阴影消除后, 路面影像的亮度过渡更加自然.

收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573232)

作者简介: 裘国永(1964—), 男, 浙江省绍兴市人, 陕西师范大学副教授, 主要研究方向为智能信息处理、信息教育技术.

**Abstract:** For the problems of brightness elevation model shadow removal algorithm GSR, such as the manual setting of key parameters and the defect in the division of the equal brightness regions and the luminance compensation method, an road shadow removal algorithm SGRSR based on the adaptive brightness elevation model was proposed. Firstly, the influence of pavement crack and pavement texture for the division of the shadow region was eliminated by using morphological dilate operation and Gaussian smoothing filter. Secondly, the maximum entropy threshold segmentation algorithm was used to calculate the partition threshold value of the shaded area and the non-shaded area of the image after Gaussian smoothing. By this way, the threshold was determined automatically. Finally, the pavement shadow was eliminated by using the improvement of the equal brightness region partition model and the luminance compensation method. Experimental results showed that the SGRSA algorithm could eliminate the shadow of the pavement image automatically and had the more natural transition in the brightness of the pavement image compared with the GSR algorithm.

## 0 引言

中国公路交通正处于高速发展时期,随着公路里程的增加和人们对于行车安全性、舒适性要求的不断提高,高效的路面裂缝检测方法已经成为业界研究的重点<sup>[1]</sup>。但是,路旁的建筑物、树木、灯杆等干扰物,常常会在路面上形成阴影<sup>[2]</sup>,这给路面裂缝的检测和特征的提取带来巨大的挑战。因此,在路面裂缝检测与特征提取之前,对路面上的阴影进行消除,对于道路的养护和管理至关重要。

为了消除影像中的阴影,国内外业界进行了广泛而深入的研究。H. Li 等<sup>[3]</sup>在分析航空影像中阴影特点的基础上,提出了一种遥感航空影像自适应非局部正则化阴影消除方法;T. P. Wu 等<sup>[4-5]</sup>采用人工标记和贝叶斯网络方法研究了复杂场景下阴影提取的问题;E. Arbel 等<sup>[6]</sup>假设半影区域的亮度分布为一个弧形的曲面,然后通过曲面拟合的方法实现彩色影像中半影区域纹理的恢复;F. Liu 等<sup>[7]</sup>基于原始影像,构建了一个没有阴影并且纹理一致的梯度区域,并且以此为模板消除影像中的阴影;A. Mohan 等<sup>[8]</sup>开发了一款阴影消除的编辑软件,通过人工指定阴影区域的边界,设置亮度补偿的强度,进而实现影像中阴影的消除;G. D. Finlayson 等<sup>[9-11]</sup>假设阴影区与非阴影区过渡边界

的梯度为零,以此为基础进行阴影的消除;W. Zhang 等<sup>[12]</sup>利用双边缘成像的方法对交通影像中的阴影消除进行了研究;R. Ramamoorthi 等<sup>[13-14]</sup>基于傅里叶理论对投射阴影进行了研究;N. Salamati 等<sup>[15]</sup>基于概率阴影图对消除真实影像中的阴影进行了研究。但是,上述这些阴影消除算法并没有完全解决阴影消除后,阴影区域和非阴影区域纹理对比度不一致、阴影区域和非阴影区域亮度过渡不自然、对阴影不能自动进行消除的问题。加之,路面阴影具有半影区巨大、形状极不规则的特点,如果直接使用上述阴影消除算法,则路面阴影消除的效果很差。

针对路面阴影的特点,邹勤等<sup>[2,16]</sup>提出了一种基于亮度高程模型的阴影消除算法 GSR,有效地解决了阴影区域和非阴影区域难以界定、阴影区域路面裂缝和路面纹理对比度不强的问题。但是,GSR 算法中的关键参数需要根据经验值进行手动设置,并且 GSR 算法中的亮度等高区域的划分模型和亮度补偿方法存在比较严重的缺陷。鉴于此,本文拟提出一种基于自适应亮度高程模型的路面阴影消除算法,简称 SGRSR 算法,以期解决 GSR 算法存在的问题,使路面阴影消除更真实自然。

## 1 GSR 算法

在自然环境中,由于太阳光的照射,路旁的

建筑物、树木和路灯等干扰物常常会在路面上形成阴影.同时,由于物体本身对于太阳光线也会发生反射、漫反射等物理现象,因此,路旁的这些干扰物在路面上形成的阴影具有半影区巨大、形状极不规则的特点,所以对阴影区域的准确界定十分困难;另一方面,由于在同一幅路面阴影影像中,各像素点的亮度值都是在同一时间内采集得到的,这就使得阴影区域路面裂缝和路面纹理的对比度弱于非阴影区域路面裂缝和路面纹理的对比度.这些细节都会增加路面阴影消除的难度.路面阴影的特点如图1所示.

GSR算法的步骤大致可以分为以下4步.

**步骤1 形态闭合运算(*mmClose*).**采用形态学闭合运算对原始路面影像进行处理,去掉路面的裂缝,消除裂缝对后续阴影区域划分的影响.

**步骤2 高斯平滑(*gauSmooth*).**对上一步所得结果进行二维高斯平滑,其目的是将路面纹理进行平滑处理,消除路面纹理对后续阴影区域划分的影响.

**步骤3 亮度等高区域划分(*geoLevel*).**首先计算  $N-1$  个阈值,  $0 \leq K_1 \leq K_2 \leq \dots \leq K_{N-1} \leq 255$ , 用于将上一步得到的影像划分为不同的亮度等高区域  $\{G_i | i = 1, \dots, L, \dots, N\}$ , 使区域  $G_i$  包含亮度值  $I \in (K_i - 1, K_i]$  的所有像素, 其中  $K_0 = -1, K_N = 255$ ; 为了使亮度等高区域划分算法具有普遍适用性, 各个亮度等高区域的像素

数量保持一致; 选取  $L$  个较低的亮度等级  $S = \{S_i = G_i | i = 1, 2, \dots, L\}$  作为阴影区域, 而较高的  $N-L$  个亮度等级  $B = \{G_i | i = L+1, L+2, \dots, N\}$  作为非阴影区域, 其中  $L$  取经验值  $(7/8) \times N$ .

**步骤4 具有纹理均衡的亮度补偿(*illum-Comp*).**在原始路面影像中, 对每一等级的阴影区域  $S_i$  进行亮度补偿, 所对应的的亮度补偿公式为

$$I'_{i,j} = \begin{cases} \alpha \times I_{i,j} + \lambda & (i,j) \in S \\ I_{i,j} & (i,j) \in B \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\alpha = D_B/D_S$ ,  $D_B$  和  $D_S$  分别表示非阴影区域和阴影区域像素亮度值的标准方差;  $\lambda = I'_B - \alpha \times I'_S$ ,  $I'_B$  和  $I'_S$  分别表示非阴影区域和阴影区域像素亮度的平均值.

## 2 SGRSR 算法

### 2.1 SGRSR 算法对 GSR 算法的改进

**2.1.1 对形态学闭合运算的改进** 三通道的路面影像在经过灰度化之后, 就转换成了单通道的灰度影像. 在路面裂缝的灰度影像中, 路面裂缝的灰度等级较低, 并且大多数时候与黑色比较接近. 因此, 使用形态学中的膨胀运算就可以消除路面裂缝. 当然, 使用形态学闭合运算也可以达到消除路面裂缝的目的, 但是, 形态学闭合运算是先进行膨胀运算, 再进行腐蚀运算, 不



图1 路面阴影的特点

Fig. 1 The characters of the pavement shadow

仅增加了算法的时间复杂度,还使阴影区域和非阴影区域交界处的灰度强度变化更加剧烈,这将会导致在阴影消除后的路面影像中,阴影区域和非阴影区域的亮度出现过渡不自然的现象.基于以上分析,SGRSR 算法将 GSR 算法中的形态学闭合运算改进为形态学膨胀运算.

**2.1.2 对阴影区域和非阴影区域划分阈值的改进** 由 GSR 算法中的步骤 3 可知,GSR 算法中阴影区域和非阴影区域的划分阈值  $L$  需要根据经验进行手动设置,显然这是不合理的.尤其是针对海量的路面影像进行阴影消除时,将会显得十分不科学.针对这一问题,本文对高斯平滑后的路面阴影影像进行了深入的分析(见图 2).在图 2b)高斯平滑后的路面影像中取 3 条剖面线 Sec. 1, Sec. 2 和 Sec. 3,图 2c)—e)分别为这 3 条剖面线的亮度分布直方图,从中可以看出,在阴影区域与非阴影区域的交界区域,灰度的亮度值出现剧烈的变化. SGRSR 算法对阴影区域和非阴影区域的划分阈值进行了改进,具体做法是对高斯平滑后的路面影像进行最大

熵阈值分割,求解出这一阈值分割过程中的分割阈值,并且将此阈值作为阴影区域和非阴影区域的划分阈值,从而实现划分阈值的自适应确定.图 2f)为高斯平滑后的路面阴影影像进行最大熵阈值分割后的结果.

**2.1.3 对亮度等高区域划分模型的改进**

GSR 算法将每一个亮度等高区域内的像素点数目设为  $n_g$ ,并且使各个亮度等高区域内的像素点数量保持一致.但是,仔细推导亮度等高区域划分算法可知,该算法并不能保证各个亮度等高区域内的像素点数量大体一致,阴影消除后的路面影像出现亮度过渡极其不自然的问题. SGRSR 算法对 GSR 中亮度等高区域划分算法进行了改进,具体的做法是将原算法中每一灰度等级遍历一次影像之后才将此灰度等级内的像素点数量与  $n_g$  进行比较,改为在每一灰度等级中遍历图像的一行之后就立刻将此灰度等级内的像素点数量与  $n_g$  进行比较,改进之后的亮度等高区域划分算法如下.

输入:高斯平滑之后的路面阴影影像  $img_s$ ,

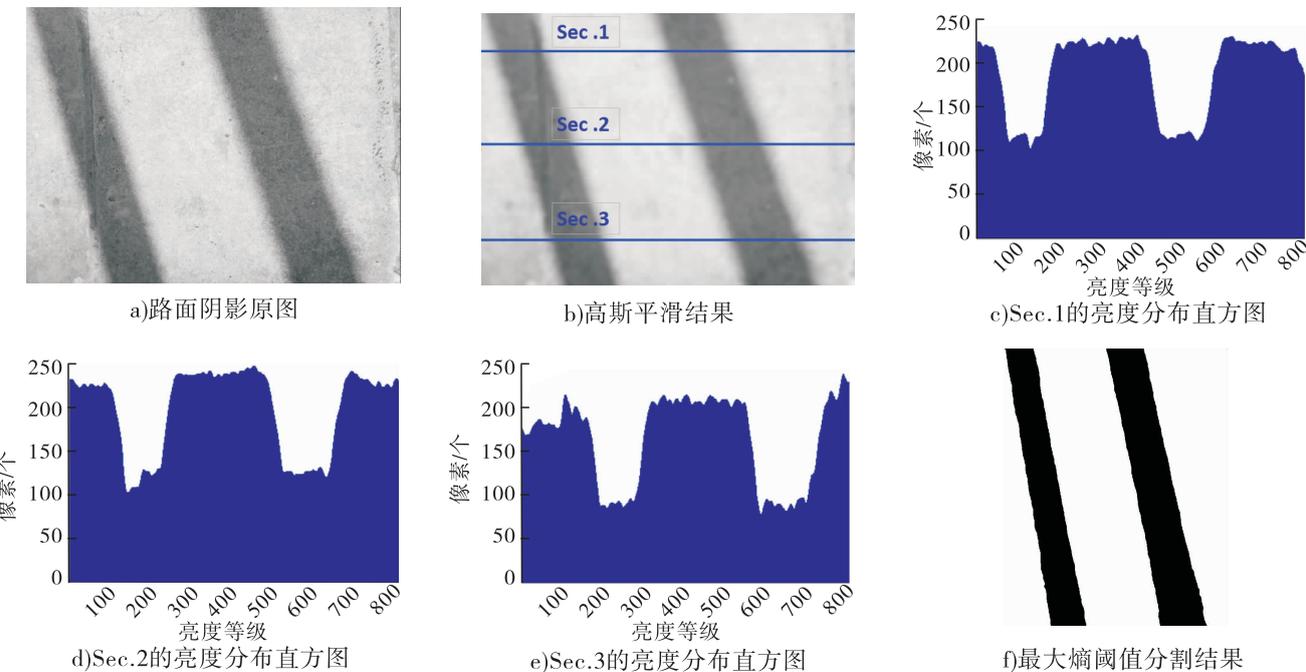


图 2 高斯平滑后的路面阴影影像分析

Fig. 2 The analysis of the pavement image after Gauss smoothing

亮度等高区域的数目  $N = 256$ ;

输出:亮度等高区域  $\{G_i | i = 1, \dots, L, \dots, N\}$

procedure *geoLevel*

$$n_g = \frac{\text{Width}(img_s) * \text{Height}(img_s)}{N}, i = 1,$$

$sum = 0$ ;

for  $k = 0$  to 255

for  $h = 0$  to  $\text{Height}(img_s)$

for  $w = 0$  to  $\text{Width}(img_s)$

$P_k$  获取像素亮度值为  $k$  的所有

像素;

将  $P_k$  加入  $G_i$ ;

$sum = sum + \text{Number\_of\_Pixel}(P_k)$ ;

end for

if  $sum \geq n_g$  then  $i = i + 1, sum = 0$ ;

end if

end for

end for

$N = i$

End procedure

**2.1.4 对亮度补偿公式的改进** 由亮度补偿公式①可知,GSR 算法中的亮度补偿只针对阴影区域进行,但公式①并不能十分精确地计算出阴影区域中每一个像素点的亮度与该像素点在太阳光线相同强度照射下的亮度差值,因此,在进行路面阴影消除的时候,如果仅仅只对阴影区域的像素点进行亮度补偿,有可能会出现在阴影消除后的路面影像阴影区域和非阴影区域亮度过渡不自然的问题.SGRSR 算法对 GSR 算法中的亮度补偿公式进行了改进,改进之后的亮度补偿公式为

$$I'_{i,j} = \alpha \times I_{i,j} + \lambda \quad (2)$$

其中, $I_{i,j}$ 为路面影像中每一像素点的亮度值。

通过参数  $\alpha$  的引入,亮度补偿公式①可以将阴影区域的方差提升到非阴影区域的水平。由于影像像素方差的大小通常反映了影像对比

度的强弱,因此,亮度补偿公式①可以使阴影消除后的路面影像的纹理细节保持一致。但深入研究后发现,当  $D_s$  趋于无穷小时,也就是当影像中阴影区域的对比度极其微弱的时候,关键参数  $\alpha$  的值将会趋于无穷大,从而使得亮度补偿公式①失效.SGRSR 算法对  $\alpha$  的计算方式进行了改进,改进之后的计算公式为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{D_B}{D_S} & D_s \geq 1 \\ D_B & D_s < 1 \end{cases}$$

## 2.2 SGRSR 算法步骤

通过对 GSR 算法缺陷的分析与改进,提出了 SGRSR 算法,其步骤如下。

**步骤 1** 影像的灰度化运算(*grayImg*)。将采集到的 RGB 路面阴影影像通过影像的灰度化运算,转换为灰度影像,为阴影消除算法的后续处理做好准备。

**步骤 2** 形态学膨胀运算(*mmDilate*)。采用形态学中的膨胀运算对原始路面影像的灰度影像进行处理,去除路面影像中的路面裂缝。因为在灰度影像中,路面裂缝的灰度与阴影区域的灰度比较接近,形态学膨胀运算可消除路面裂缝对于后续路面阴影区域和非阴影区域划分的影响。

**步骤 3** 高斯平滑(*gauSmooth*)。对上一步经过形态学膨胀运算所得的结果进行二维高斯平滑,消除路面纹理对于后续阴影区域划分的影响。

**步骤 4** 最大熵阈值分割(*metSegment*)。对上一步经过高斯平滑的路面影像进行最大熵阈值分割,求解出阴影区域和非阴影区域分割过程中的阈值,并且将此阈值记为 *metS*。本步操作的目的有两点:一是实现阴影区域和非阴影区域划分阈值的自适应确定,而不必再基于经验值进行手动设置;二是确定路面影像中阴影区域和非阴影区域的位置。

**步骤5** 求解非阴影区域的关键参数  $D_B$  和  $I'_B$  (*brightParameter*). 根据上一步确定的路面非阴影区域,求解出非阴影区域的关键参数  $D_B$  和  $I'_B$ ,目的是为后续全影像亮度补偿做准备.

**步骤6** 改进亮度等高区域划分模型 (*ige-oLevel*). 根据改进的亮度等高区域划分算法,将经过高斯平滑的路面影像划分为  $N$  个不同的亮度等高区域  $\{G_i | i = 1, \dots, L, \dots, N\}$ ,使区域  $G_i$  包含亮度值  $I \in (K_i - 1, K_i]$  的所有像素,其中  $K_0 = -1, K_N = 255$ .

**步骤7** 全影像亮度补偿 (*allillumComp*). 在原始路面影像的灰度影像中,根据上一步划分的亮度等高区域,首先计算出每一亮度等高区域像素亮度的方差  $D'_s$  和像素亮度的平均值  $I'_s$ ;然后,计算出每一亮度等高区域的  $\alpha$  值;最后,再根据亮度补偿公式②对全影像进行亮度补偿.

### 3 SGRSR 算法验证

为了验证本文提出的 SGRSR 算法的有效性,设计了4组对比实验,用于对 SGRSR 算法中的关键步骤进行分析,结果如表1和图3—图6所示. 本文算法的程序是基于 VC, OpenCv 和 Matlab 开发的,程序的运行环境为 Windows 10, CPU 为 3.3 GHz, 内存为 8 G.

1) 第1组实验:测试 SGRSR 算法对于 GSR 算法中形态学闭合运算的改进情况. 实验的结果如表1和图3所示.

表1 SGRSR 膨胀运算与 GSR 闭合运算进行路面裂缝消除的性能对比  
Table 1 The performance comparison of eliminating pavement cracks using *mmDilate* and *mmClose*

| 路面阴影影像 | 影像分辨率/像素    | GSR 算法的处理时间/ms | SGRSR 算法的处理时间/ms | 性能提高率/% |
|--------|-------------|----------------|------------------|---------|
| 图 3a)  | 856 × 612   | 10.767 10      | 5.539 85         | 49.86   |
| 图 3f)  | 1632 × 1224 | 4.594 39       | 2.422 10         | 47.28   |

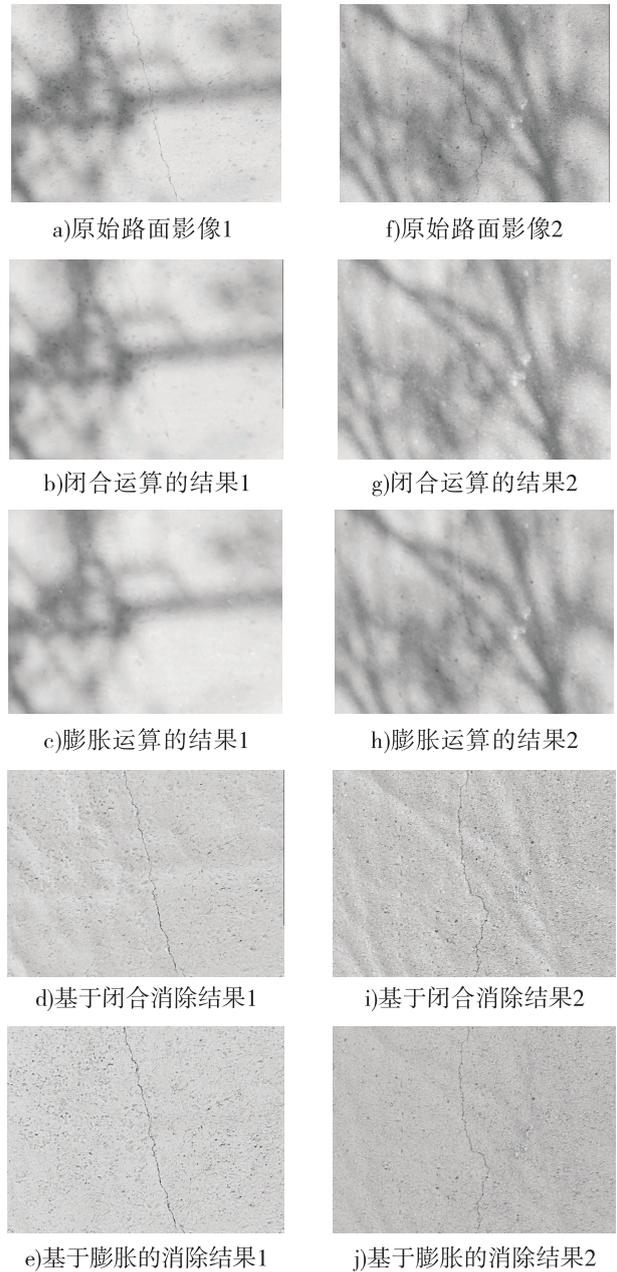


图3 SGRSR 膨胀运算与 GSR 闭合运算对于路面裂缝消除及阴影消除结果的对比

Fig.3 The result comparison of eliminating pavement cracks and removing shadow using *mmDilate* and *mmClose*

由表1和图3可知,SGRSR 算法中的形态学膨胀运算同样可以达到 GSR 算法形态学闭合运算消除路面裂缝的目的,还能更好地实现路面阴影的消除,并且在算法性能上大大优于 GSR 中的形态学闭合运算.

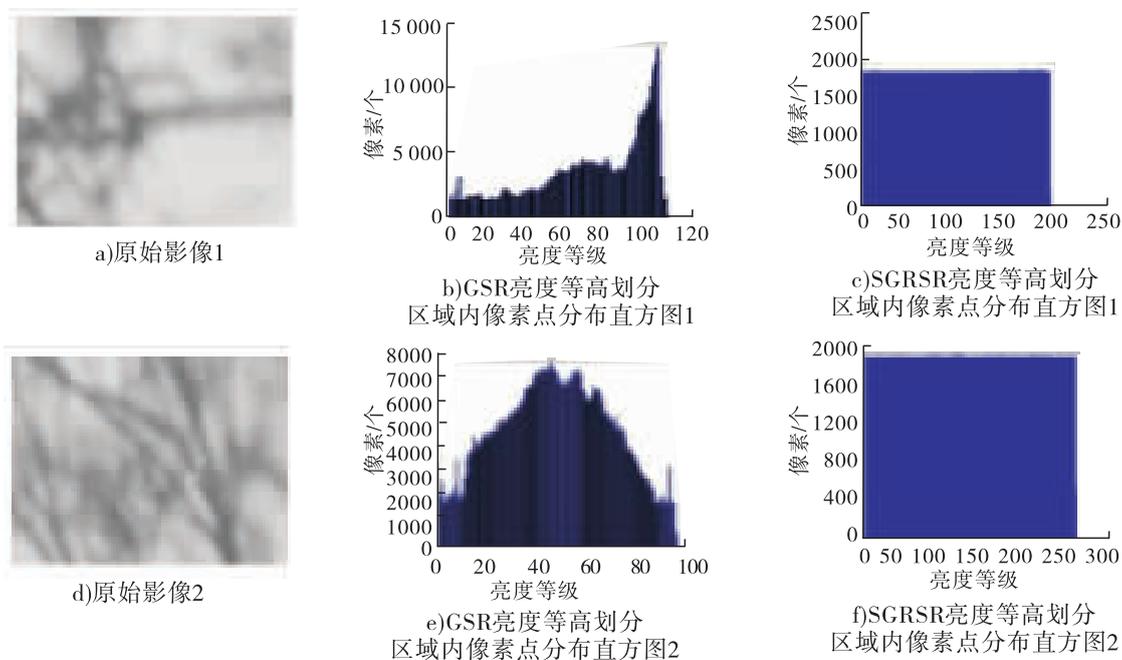


图 4 GSR 算法和 SGRSR 算法亮度等高区域划分模型的对比

Fig. 4 The comparison of the classification of luminance levels using GSR and SGRSR

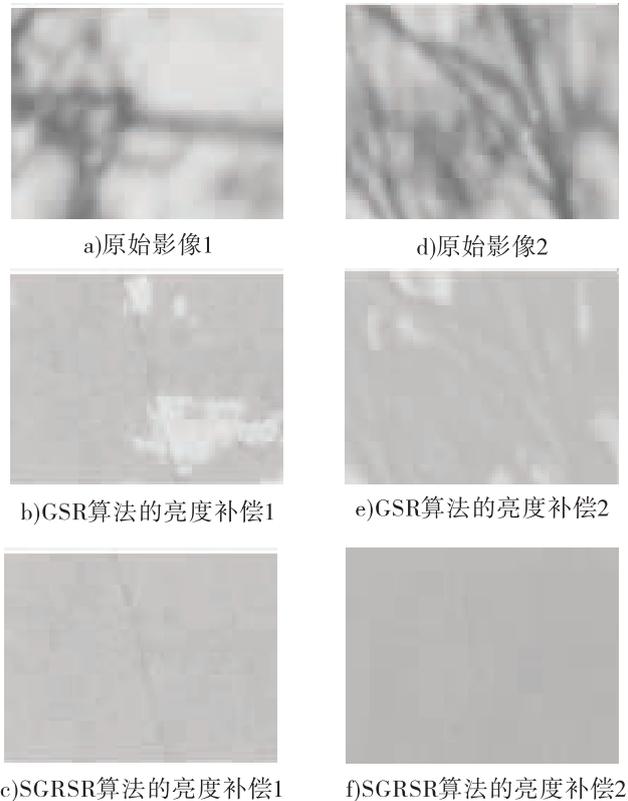


图 5 GSR 算法和 SGRSR 算法亮度补偿效果的对比

Fig. 5 The result comparison of luminance compensation using GSR and SGRSR

2) 第 2 组实验:测试 SGRSR 算法对于 GSR 算法中亮度等高区域划分模型的改进情况. 实验结果如图 4 所示. 由图 4 可见, SGRSR 算法中改进的划分模型可以使得各个亮度等高区域内的像素点数量基本保持一致, 这有利于增强 SGRSR 算法对其他阴影消除的适用性, 并且会使阴影消除后的路面影像的亮度过渡更加自然.

3) 第 3 组实验:测试 SGRSR 算法对于 GSR 算法中亮度补偿公式的改进情况. 实验结果如图 5 所示. 由图 5 可见, 基于 GSR 算法中的亮度补偿公式进行阴影消除后, 路面影像会出现亮度分布不均匀的问题, 而基于 SGRSR 算法改进之后的亮度补偿公式, 则可以很好地弥补这一缺陷.

4) 第 4 组实验:测试 SGRSR 算法和 GSR 算法的路面阴影消除能力. 实验结果如图 6 所示. 由图 6 可见, 基于 GSR 算法对路面阴影进行消除, 路面影像阴影区域和非阴影区域亮度过渡不自然, 而且路面影像整体亮度分布不均匀; 而本文所提出的 SGRSR 算法不仅不存在以

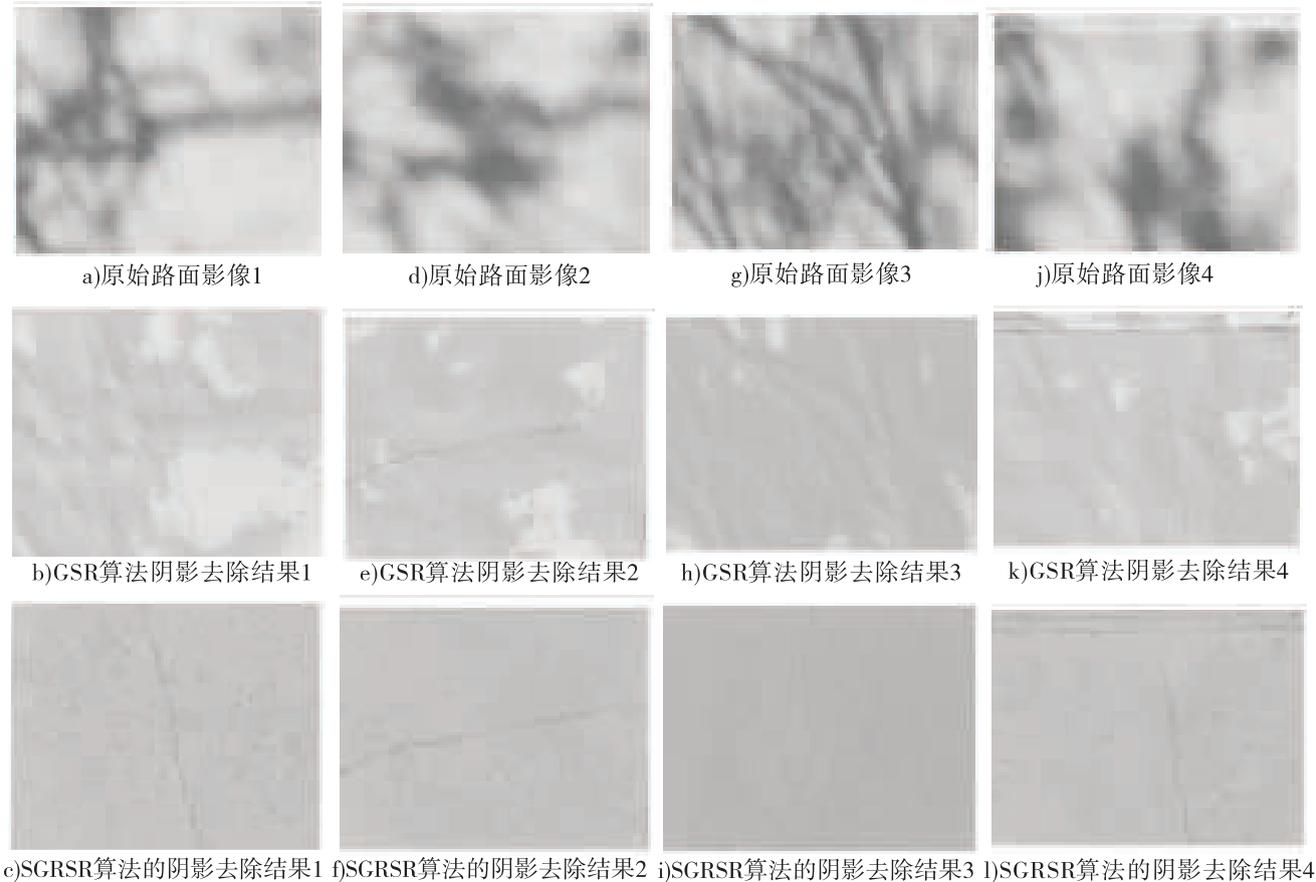


图6 GSR算法和SGRSR算法阴影去除效果的对比

Fig. 6 The comparison of result of removing shadow using GSR and SGRSR

上问题,而且还能增强路面纹理和路面裂缝的对比度,明显优于GSR算法,可以满足实际工程中路面阴影消除的需求。

### 4 结语

针对亮度高程模型的阴影消除算法GSR中的关键参数需要手动设置、亮度等高区域划分模型和亮度补偿公式的缺陷,本文在改进GSR算法的基础上提出了SGRSR算法.实验结果表明,该算法不仅有效地解决了GSR算法存在的问题,而且还在一定程度上增强了路面纹理和路面裂缝的对比度,达到了消除路面阴影的目的.未来进一步研究的重点是在不断增强SGRSR算法路面阴影消除能力的情况下,基于CUDA,OpenMP,SSE等策略对算法作进一步优化,提高算法的处理速度,使其在实际的工程应

用中表现出更好的性能。

### 参考文献:

[1] 彭博,蒋阳升,韩世凡,等.路面裂缝图像自动识别算法综述[J].公路交通科技,2014,31(7):19.

[2] 邹勤.低信噪比路面裂缝增强与提取方法研究[D].武汉:武汉大学,2012.

[3] LI H,ZHANG L,SHEN H. An adaptive nonlocal regularized shadow removal method for aerial remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(1):106.

[4] WU T P,TANG C K,BROWN M S,et al. Natural shadow matting [J]. ACM Transactions on Graphics,2007,26(2):8.

- [5] WU T P, TANG C K. A bayesian approach for shadow extraction from a single image [ C ] // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2005: 480 – 487.
- [6] ARBEL E, HEL-OR H. Texture-preserving shadow removal in color images containing curved surfaces [ C ] // 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2007: 1 – 8.
- [7] LIU F, GLEICHER M. Texture-consistent shadow removal [ C ] // 10th European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2008: 437 – 450.
- [8] MOHAN A, TUMBLIN J, CHOUDHURY P. Editing soft shadows in a digital photograph [ J ]. Computer Graphics & Applications IEEE, 2007, 27(2): 23.
- [9] FINLAYSON G D, DREW M S, LU C. Intrinsic images by entropy minimization [ M ] // European Conference on Computer Vision-ECCV 2004. Heidelberg: Springer, 2004: 582 – 595.
- [10] FINLAYSON G D, HORDLEY S D, LU C, et al. On the removal of shadows from images [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2006, 28(1): 59.
- [11] FINLAYSON G D, HORDLEY S D, DREW M S. Removing Shadows from Images [ C ] // European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2002: 823 – 836.
- [12] ZHANG W, ZHANG G, WANG Y, et al. An investigation into shadow removal from traffic images [ J ]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2000(1): 70.
- [13] RAMAMOORTHY R, KOUDELKA M, BELHUMEUR P. A fourier theory for cast shadows [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(2): 288.
- [14] RAMAMOORTHY R, KOUDELKA M, BELHUMEUR P. A fourier theory for cast shadows [ C ] // European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2004: 146 – 162.
- [15] SALAMATI N, GERMAIN A, SIISSTRUNK S. Removing shadows from images using color and near-infrared [ C ] // IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2011: 1713 – 1716.
- [16] ZOU Q, CAO Y, LI Q, et al. Crack Tree: Automatic crack detection from pavement images [ J ]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(3): 227.