

非对称广义高斯亮度迁移与局部信息融合的土壤图像增强*

邓 亿^{1,2}, 曾绍华^{1,2}, 詹林庆³, 陈亚楠⁴, 刘国一⁵

(1. 重庆师范大学 计算机与信息科学学院; 2. 重庆师范大学 重庆市数字农业服务工程技术研究中心, 重庆 401331;
3. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121; 4. 重庆市万州区土肥与农业生态保护站, 重庆 404199;
5. 西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 拉萨 850032)

摘要:【目的】为减小土壤图像成像环境条件差异对机器视觉识别土种精度的影响,提出对野外自然环境下采集的土壤图像可控光照增强。【方法】首先,用非对称广义高斯曲线拟合土壤图像 V 分量直方图,并在拟合曲线中引入目标迁移量,完成图像亮度迁移,实现土壤图像全局亮度可控增强;然后,利用全局和局部信息估计图像在局部区域上的光照权重,引入目标亮度,根据权重确定局部增量,并将局部增量叠加到原始 V 分量,实现基于局部增量的土壤图像亮度增强;再利用sigmoid曲线,将非对称广义高斯曲线亮度迁移获得全局亮度增强结果与基于局部增量的亮度增强结果融合,获得土壤图像的亮度可控增强。最后,根据色比不变性原理,分别对原始土壤图像 R 、 G 、 B 分量进行颜色校正。【结果】仿真实验表明:土壤图像从低亮度向高亮度迁移时,增强图像与目标图像在 V 分量上各对应像素的亮度差异均值为10.5267,与目标图像亮度均值差异为0.2451;从高亮度向低亮度迁移时,各对应像素的亮度差异均值为10.7430,与目标图像亮度均值差异为0.2721;本文所提算法在亮度控制上较其他算法具有更高的精度;主观质量评价表明,以原图亮度为基准, $[-30, 30]$ 为土壤图像有效增强范围;【结论】所提方法能够实现亮度可控的土壤图像增强,算法是有效的。

关键词: 图像增强;亮度控制;土壤图像;直方图规定化;机器视觉

中图分类号: TP751.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2023)03-0139-16

野外自然环境下,多变的光照条件导致机器视觉采集的同一土种图像表征的土壤信息特征可能不完全一致。如果不同土壤图像能转换到相同条件下表征土壤信息特征,无疑可提升机器视觉识别土种精度。为了减小成像环境条件差异的影响,将不同光照下采集的土壤图像调整为非常近似于该土壤在某些特定自然光照条件下采集的具有额定亮度的真实土壤图像是一项非常有意义的工作,这项工作的实质是土壤图像增强。前人对图像增强做了大量研究工作^[1-18],但针对土壤的图像增强鲜见报道。已有研究中图像增强的方法主要包括:非线性增强^[7-11]、直方图均衡化^[12-16]和直方图规定化^[17-18]。其中,直方图规定化是图像增强的重要技术之一,许多学者对该方法进行了改进。赵通等人^[19]通过计算直方图的一阶导数和二阶导数来获得直方图的方差和极值,拟合直方图的多峰高斯函数,并对此函数进行调整作为规定化中的目标直方图。为了解决人脸图像中局部光照过强、纹理模糊等问题,Liu等人^[20]提出了基于局部直方图规定的人脸图像预处理算法,该算法能减弱人脸图像局部高频光照并对人脸重要特征的低频部分进行增强。虽然直方图规定化增强图像亮度、对比度能较好地提升图像视觉质量,但由于无法精准控增强图像亮度,因此不能解决土壤图像增强问题。

为了控制增强图像亮度,Xiao等人^[21]利用一维高斯曲线的可控制性,通过调整高斯曲线参数控制增强图像亮度、对比度;为了达到更理想的增强效果,进一步使用二维高斯代替一维高斯作进行直方图规定化,实现图像的亮度可控增强。但此算法将图像直方图调整为高斯曲线形状,未考虑增强图像本身应具有的直方图分布特性。为了进一步精准控制增强土壤图像亮度,有研究利用多个不同参数的高斯曲线对土壤图像亮度直方图左部进行分段拟合,最终获得多次高斯拟合的加权拟合曲线^[22];然后通过调整多高斯加权拟合曲线的高斯函数参数对土壤图像亮度可控迁移,以迁移曲线为目标直方图,进行直方图规定化获得亮度可控增强土壤图像;此算法既

* 收稿日期:2022-08-23 修回日期:2022-10-10 网络出版时间:2023-04-21T10:04

资助项目:重庆市教育委员会科学技术研究重点项目(No. KJZD-K201900505);重庆市高校创新研究群体(No. CXQT20015);重庆市研究生科研创新项目(No. CYS22564);重庆市技术预见与制度创新项目(No. CSTB2022TFII-OFX0043)

第一作者简介:邓亿,女,研究方向为数字图像处理,E-mail:850859992@qq.com;通信作者:曾绍华,男,教授,博士,E-mail:zsh_cqu@126.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20230420.1651.032.html

保留了亮度直方图的分布特性,又达到了精确控制图像亮度的目的,但算法多次搜索拟合区间,拟合亮度直方图算法平均迭代次数 6~8 次,时间复杂度较高。

显然,上述研究对图像亮度实现了可控增强,但在亮度直方图分布特性和拟合直方图的复杂性方面却有一定缺陷,均忽略了土壤图像局部信息;此外,直方图规定化中的映射算法可能产生较严重的块效应,将损失土壤图像局部梯度特性。因此,土壤图像亮度可控增强尚可进一步深入研究。

1 非对称广义高斯亮度迁移

为了保持土壤图像亮度直方图的分布特性并降低直方图拟合的复杂性,本文引入非对称广义高斯曲线拟合土壤图像亮度直方图。

1.1 土壤图像亮度直方图分布特性

在不同的自然光照下拍摄 456 张土壤图像,每张土壤图像的不同位置处截取(图 1a)300×300 不含背景的土壤子图。随机选取 950 张土壤子图,从 RGB 颜色空间转化为 HSV 颜色空间,获得亮度 V 分量(图 1b)进行直方图分析,发现亮度级分布连续(图 1c),总体近似于偏态的高斯分布(图 1d)。

1.2 构建直方图的非对称广义高斯优化模型

土壤图像 V 分量的亮度分布域为 $V=[v_1, v_k]$,其中 $v_1=v_{\min}$, $v_k=v_{\max}$, $v_{\min}$ 和 $v_{\max}$ 分别为亮度分布域的最小和最大值,则土壤图像 V 分量直方图表示为 $p(v_i)=\frac{n_i}{(w \cdot h)}$,其中: v_i 是第 i 个亮度级, $v_i \in [v_1, v_k]$, n_i 是图像中亮度级为 v_i 的像素个数, w 表示图像的宽, h 表示图像的高。

在图像亮度分布域 $V=[v_1, v_k]$ 下,非对称广义高斯拟合土壤图像 V 分量直方图(如图 1d),构建非对称广义高斯(asymmetric generalized Gaussian, AGG)拟合直方图优化模型为:

$$\arg \min_{\alpha, \sigma_l, \sigma_r, m} \sum_{i=1}^m |p(v_i) - G_l(v_i)| + \sum_{i=m}^k |p(v_i) - G_r(v_i)|, \quad (1)$$

其中: $G_l(v_i)$ 为非对称广义高斯左部, $G_l(v_i) = \frac{\alpha}{(\beta_l + \beta_r) \Gamma(\frac{1}{\alpha})} \exp\left(-\left(\frac{-v_i + m}{\beta_l}\right)^\alpha\right)$; $G_r(v_i)$ 为非对称广义高斯

右部^[23], $G_r(v_i) = \frac{\alpha}{(\beta_l + \beta_r) \Gamma(\frac{1}{\alpha})} \exp\left(-\left(\frac{v_i - m}{\beta_r}\right)^\alpha\right)$ 。上述两个式子中 $\beta_l = \sigma_l \sqrt{\Gamma(\frac{1}{\alpha})/\Gamma(\frac{3}{\alpha})}$, $\beta_r =$

$\sigma_r \sqrt{\Gamma(\frac{1}{\alpha})/\Gamma(\frac{3}{\alpha})}$, m 为非对称广义高斯在 $V=[v_1, v_k]$ 范围内尖峰的横坐标, $\alpha, \sigma_l, \sigma_r$ 为非对称广义高斯函数参数。

1.3 非对称广义高斯亮度迁移

1.3.1 引入目标亮度

将拟合后的非对称广义高斯曲线进行亮度迁移:

$$\arg \min_m \mu_{\text{target}} - \sum_{j=1}^{m+m'} |G_l(v'_j) \cdot v'_j| - \sum_{j=m+m'}^l |G_r(v'_j) \cdot v'_j|。$$

其中: μ_{target} 为目标亮度, m' 为亮度迁移的偏移量。迁移时, $m+m'$ 代替式(1)中的 m , 即非对称广义高斯曲线峰值点从 m 迁移到 $m+m'$, 实现非对称广义高斯曲线迁移。

亮度迁移后的非对称广义高斯曲线亮度分布域为 $V'=[v'_1, v'_l]$, 直方图为:

$$p(v'_j) = \frac{G(v'_j)}{\left(\sum_{j=1}^{m+m'} G_l(v'_j) + \sum_{j=m+m'}^l G_r(v'_j)\right)}。$$

其中: v'_j 是亮度迁移后的第 j 个亮度级, $v'_j \in [v'_1, v'_l]$ 。

根据直方图规定化中的单映射定律^[24], 利用累积分布 $c(v_i)$ 和 $c(v'_j)$ 将输入图像的亮度 $v_i \in [v_1, v_k]$ 迁移到输出图像的亮度 $v'_j \in [v'_1, v'_l]$, $(v_i, v'_j) = \arg \min_{v_i, v'_j} |c(v_i) - c(v'_j)|$ 。

经单映射后的图像亮度分量表示为 V_{sml} , 直方图为 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 。直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ (图 2a) 中存在异常增高和缺失的情况。经过分析发现, 它是因为映射算法将输入图像中多个亮度映射为输出图像上的一个亮度造成的。它会使土壤图像亮度迁移产生较严重的块效应, 继而损失图像局部梯度特性, 需要重映射校正。

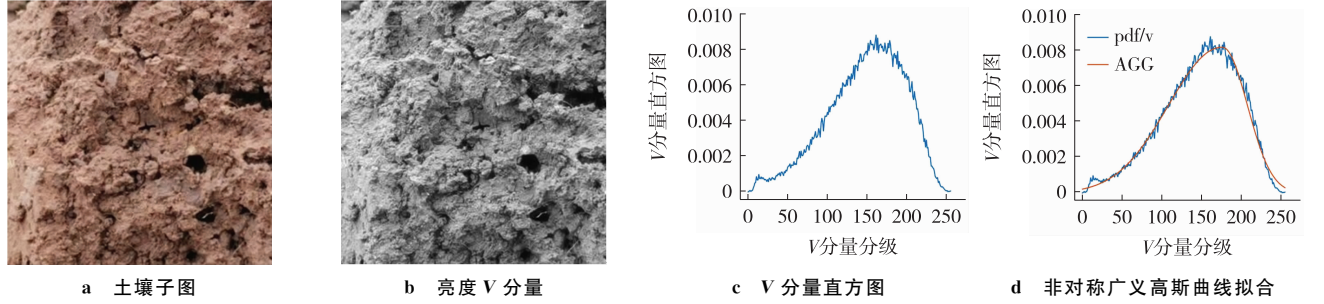


图 1 土壤图像亮度直方图及非对称广义高斯拟合

Fig. 1 Brightness histogram of soil image and its fitting curve based on AGG

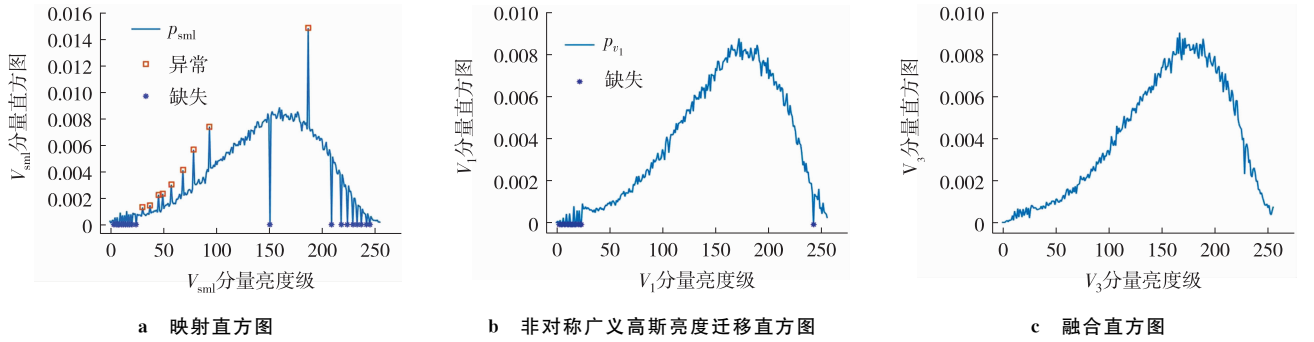


图 2 非对称广义高斯亮度迁移与局部信息融合的土壤图像直方图

Fig. 2 Soil images histograms of integrating brightness migration based on AGG and spatial information in process

1.3.2 迁移亮度直方图校正

1) 异常点检测。从直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 中筛选出异常点 v'_j , 异常点 v'_j 同时满足: 直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 中, 异常点 v'_j 对应的 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 大于邻域均值; 映射中, 多个原亮度级 v_i 映射到同一亮度级 v'_j 。在进行异常点检测之前对 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 进行一次“排零”操作, 剔除零数据对直方图平滑带来的影响。

$$\text{由异常点 } v'_j \text{ 组成有序集合 } A = \left\{ v'_j \mid p_{\text{sml}}(v'_j) - \left(\frac{\sum_{a=-3}^3 p_{\text{sml}}(v'_{j+a})}{7} \right) > 0 \ \&\& \ n'_j \geq 2 \right\}, \text{ 其中: } n'_j \geq 2 \text{ 表示原图}$$

中至少有 2 个亮度级映射为输出图像中的亮度级 v'_j 。

2) 迁移直方图校正算法。首先, 从迁移直方图中统计零值点和异常点; 然后, 找出映射关系中异常点的位置坐标; 最后, 根据距离最小原理将异常点重映射到零值点, 直至所有异常点完成校正。获得迁移直方图校正算法见算法 1。

算法 1 输入: 映射关系级 $M = \{(v_1, v'_1), \dots, (v_i, v'_i), \dots, (v_k, v'_l), v_i = v_1, \dots, v_k, v'_j \in [v'_1, v'_l]\}$;

迁移亮度直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j), v'_j \in [v'_1, v'_l]$ 。

过程: $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 中的零值点组成集合 L :

$$L = \{v'_j \mid p_{\text{sml}}(v'_j) = 0, j \in (1, l)\}, n_L = \text{length}(L); (\text{length 为求集合大小的函数, 表示集合 } L \text{ 中有 } n_L \text{ 个元素})$$

检测迁移亮度直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 的异常点, 得异常点组成的集合 A :

$$A = \left\{ v'_j \mid p_{\text{sml}}(v'_j) - \left(\frac{\sum_{a=-3}^3 p_{\text{sml}}(v'_{j+a})}{7} \right) > 0 \ \&\& \ n'_j \geq 2 \right\}, n_A = \text{length}(A);$$

```

for  $s=1:n_A$  {
  while ( $n'_s > 1$ ) {
    查找集合  $A$  中第  $s$  个元素  $A(s)$  在  $M$  中  $(v_i, v'_j)$  所处的位置  $q$ :
    for  $v_i = v_1:v_k$  { if ( $v'_j = A(s)$ ), 则:  $q = i$ ; }
    异常点  $A(s)$  对应  $M$  中的  $v'_j$  从位置  $q$  处校正到  $L$  中某一零值点:
    if ( $A(s) > L(n_L)$ ), 则: repeat {  $v'_q = v'_q - 1; q = q - 1$ ; } until ( $v'_q = L(n_L)$ );
    if ( $A(s) < L(1)$ ), 则: repeat {  $v'_q = v'_q + 1; q = q + 1$ ; } until ( $v'_q = L(1)$ );
    if ( $A(s) > L(b)$  &&  $A(s) < L(c)$ ), 则:
      if ( $A(s) - L(b) > L(c) - A(s)$ ), 则: repeat {  $v'_q = v'_q + 1; q = q + 1$ ; } until ( $v'_q = L(c)$ );
      if ( $A(s) - L(b) < L(c) - A(s)$ ), 则: repeat {  $v'_q = v'_q - 1; q = q - 1$ ; } until ( $v'_q = L(b)$ );
    if ( $|A(s) - L(b)| = |A(s) - L(c)|$ ), 则:
      if ( $\sum_{j=1}^{A(s)} p_{\text{sml}}(v'_j) > \sum_{j=A(s)}^l p_{\text{sml}}(v'_j)$ ), 则:
        repeat {  $v'_q = v'_q + 1; q = q + 1$ ; } until ( $v'_q = L(c)$ );
      if ( $\sum_{j=1}^{A(s)} p_{\text{sml}}(v'_j) < \sum_{j=A(s)}^l p_{\text{sml}}(v'_j)$ ), 则:
        repeat {  $v'_q = v'_q - 1; q = q - 1$ ; } until ( $v'_q = L(b)$ );
     $n'_s = n'_s - 1$ ;
    更新  $L$ ;
  }
}

```

输出: 亮度分量 V_1

1.3.3 非对称广义高斯亮度迁移算法

为了减小重映射后 V_1 的亮度均值与目标亮度均值的差异, 以迭代方式不断调整亮度偏移量 m' , 逐步逼近输出图像目标亮度。获得的非对称广义高斯亮度迁移算法, 见算法 2。

算法 2 输入: 土壤图像 V 分量, 其中 $v_i \in [v_1, v_k]$; 2. V 分量亮度均值 μ_v ; 3. 目标均值 μ_{target} 。

初始化: 迭代次数 $t=0$; 2. 置偏移量 $m'_0 = \mu_v - \mu_{\text{target}}$ 以减小迭代次数; 3. 设置阈值 $\theta=0.1$ 。

过程: 计算 V 分量直方图及累积分布, 即: $p(v_i) = \frac{n_i}{(w \cdot h)}$ 和 $c(v_i) = \sum_{a=1}^i p(v_a)$;

计算拟合曲线: $\arg\min_{a, \sigma_l, \sigma_r, m} \sum_{i=1}^m |p(v_i) - G_l(v_i)| + \sum_{i=m}^k |p(v_i) - G_r(v_i)|$;

repeat {

亮度迁移: $\arg\min \mu_{\text{target}} - \sum_{j=1}^{m+m'_t} |G_l(v'_j) \cdot v'_j| - \sum_{j=m+m'_t}^l |G_r(v'_j) \cdot v'_j|$;

计算: $p(v'_j) = \frac{G(v'_j)}{(\sum_{j=1}^{m+m'_t} G_l(v'_j) + \sum_{j=m+m'_t}^l G_r(v'_j))}$ 和 $c(v'_j) = \sum_{a=1}^j p(v'_a)$;

进行单映射 $(v_i, v'_j) = \arg\min_{v_i, v'_j} |c(v_i) - c(v'_j)|$ 获得迁移亮度分量 V_{sml} 以及直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j)$;

用迁移直方图校正算法(表 1)对迁移亮度直方图 $p_{\text{sml}}(v'_j)$ 进行校正, 得 V_1 和亮度均值

μ_{v_1} ;

更新 $t=t+1$;

更新 $m'_t = \mu_{v_1} - \mu_{\text{target}}$;
 } until ($||m'_t| - |m'_{t-1}|| < \theta$)
 输出:亮度分量 V_1

2 土壤图像局部信息

非对称广义高斯亮度迁移仅实现输出土壤图像目标亮度的总体控制。为了保持增强后的土壤图像局部亮度差异与原始土壤图像的一致性,引入土壤图像局部光照信息,实现土壤图像局部亮度增强。

2.1 局部光照权重估计

运用局部和全局光照信息,估计图像在关于像素点 (i, j) 区域上的光照权重:

$$D(i, j) = 1 - \frac{|\mu_v - V_m(i, j)|}{\max V_m - \min V_m}, D(i, j) \in (0, 1);$$

$$V_m(i, j) = \frac{\sum_{a=-1}^1 \sum_{b=-1}^1 V(i+a, j+b)}{9}。$$

其中: μ_v 为土壤图像 V 分量的全局均值, V_m 为使用 3×3 的滑动窗口对 V 分量进行均值滤波的结果, $\max V_m$ 和 $\min V_m$ 表示 V_m 中最大和最小值。

2.2 局部信息的土壤图像增强

为了保持图像局部光照分布特性,根据局部光照权重信息,获得局部增量 $V_{\text{add}}(i, j)$:

$$V_{\text{add}}(i, j) = (\mu_{\text{target}} - \mu_v) \cdot w \cdot h \cdot \frac{D(i, j)}{\sum_{i=0}^w \sum_{j=0}^h D(i, j)}。$$

其中: μ_{target} 表示目标亮度, μ_v 代表原 V 分量全局均值, w 表示图像的宽, h 表示图像的高。为了使图像达到目标亮度,将局部增量 V_{add} 叠加到原 V 分量上,即 $V_2(i, j) = V(i, j) + V_{\text{add}}(i, j)$ 。

3 亮度迁移与局部信息融合及增强后 RGB 图像

3.1 非对称广义高斯亮度迁移与局部信息融合

非对称广义高斯拟合直方图的优化模型实现对土壤图像亮度的总体迁移,局部信息的土壤图像增强保持局部亮度差异,将非对称广义高斯曲线亮度迁移结果 V_1 和局部信息 V_2 融合: $V_3(i, j) = (1 - \omega)V_1(i, j) + \omega V_2(i, j)$ 。

其中: $\omega = \frac{1}{(1 + e^{-\theta(V_2(i, j) - V_1(i, j))})}$ 。式中 θ 由 V_1 和 V_2 全局平均差自适应获得: $E(i, j) = |V_2(i, j) - V_1(i, j)|$,

$$E_{\text{norm}}(i, j) = \frac{(E(i, j) - \min E)}{(\max E - \min E)}, \theta = \frac{\sum_{i=0}^w \sum_{j=0}^h E_{\text{norm}}(i, j)}{(w \cdot h)}。其中: \max E 和 \min E 表示 E 中最大和最小值。经过$$

融合后的亮度分量 V_3 保留土壤图像局部光照信息并使输出图像目标亮度(图 2c)可控。

3.2 增强后 RGB 图像

依据原始土壤图像中的颜色信息和三分量关系的比例不变性,线性恢复增强后 RGB 土壤图像: $I_c^{\text{out}} = \left(\frac{V_3}{V}\right) \cdot I_c^{\text{in}}, c \in \{R, G, B\}$ 。其中: I_c^{in} 表示原始 RGB 土壤图像, I_c^{out} 表示颜色恢复后增强的 RGB 图像。

4 实验结果与分析

4.1 样本来源

根据重庆市地方标准《DB50/T 796—2017 重庆土壤分类与代码》^[25],以重庆地区分布的 4 土属 34 土种紫色土土壤图像为实验样本。本实验在样本的采集方案上分为成对采集和单张采集。成对采集指的是在野外自然光照下,固定相机对耕层 10~30 cm 土壤的“心土”进行拍摄,获取成对的能够完全重合的土壤图像样本,分别为遮挡部分光照的低光土壤图像和无遮挡的高光土壤图像,在每对图像相同位置处,截取 300×300 不含任何背景

的土壤子图对,共 512 对;单张采集指的是在不同自然光照下,对准土壤“心土”拍摄图像 1 157 张,每张图像截取 300×300 不含任何背景的土壤子图,统计所有子图 V 分量的平均亮度并分为高、中、低亮度等级组。

从上述样本中随机选取构成样本集。样本集 1:从成对采集的样本中,随机选取 30 对土壤图像,每组 3 对,共 10 个样本组;样本集 2:从单张采集的样本中,随机选取 30 张土壤图像,每组 3 张,共 10 个样本组;样本集 3:从单张采集的样本中,随机选取 60 张土壤图像,每组 6 张,分别从高、中、低亮度等级中各选取 2 张,共 10 个样本组。

4.2 实验设计和环境

本文算法将与目前仅有的 2 个能够控制图像亮度的 2-DHS 算法^[21]、WGSF 算法^[22]进行对比,通过设计以下 5 个实验,分别从亮度迁移的土壤图像与真实目标图像的 V 分量亮度差异、 R 、 G 、 B 分量颜色差异、亮度调节范围、亮度调节精度、平均迭代次数和运行时间花销方面验证本文算法的有效性。

实验 1:土壤图像 V 分量从低亮度向高亮度迁移精度实验和 RGB 颜色校正精度实验。用样本集 1,进行本文算法与 2-DHS 算法、WGSF 算法对比实验,比较土壤图像 V 分量从低亮度向高亮度迁移的结果与真实目标高亮度 V 分量相同位置像素的亮度差异和 R 、 G 、 B 分量相同位置像素的颜色差异。

实验 2:土壤图像 V 分量从高亮度向低亮度迁移精度实验和 RGB 颜色校正精度实验。用样本集 1,进行本文算法与 2-DHS 算法、WGSF 算法对比实验,比较土壤图像 V 分量从高亮度向低亮度迁移的结果与真实目标低亮度 V 分量相同位置像素的亮度差异和 R 、 G 、 B 分量相同位置像素的颜色差异。

实验 3:土壤图像亮度迁移有效范围实验。用样本集 3,进行土壤图像亮度递增(或递减)实验。以原土壤图像亮度均值为原点进行 $+10$ (或 -10)逐级亮度迁移,检测本文算法土壤图像亮度迁移的有效范围。

本实验通过对亮度迁移后的图像进行主观评分来获得土壤图像亮度迁移的有效范围:邀请 5 人进行评分,1 分表示土壤图像颜色真实,0 分则表示颜色失真;对每张图像的 5 次得分进行均值计算,若一张图像超过 1 人评 0 分(均分低于 0.8),则该图像视为失真;土壤图像在进行相同亮度级差迁移的均分都高于 0.8 情况下,亮度级差的正负最大值作为亮度迁移有效范围。

实验 4:土壤图像向目标亮度迁移的精度实验。用样本集 2,进行本文算法与 2-DHS 算法、WGSF 算法对比实验,在亮度迁移有效范围内,比较迁移后图像的亮度均值与目标亮度的差异。

实验 5:算法平均迭代次数和运行时间比较实验。用样本集 2,在亮度迁移有效范围内对本文算法与 2-DHS 算法、WGSF 算法进行对比,比较平均迭代次数和运行时间花销。

实验硬件环境: Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @2.60 GHz 2.59 GHz,内存 16 GB,显卡 NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti;实验软件环境: Windows 11 家庭版 64 位, Visual Studio 2019+ opencv3.4.11。

4.3 实验结果及分析

4.3.1 土壤图像从低向高亮度迁移实验结果及分析

在样本集 1 上使用本文算法、2-DHS 算法、WGSF 算法进行实验 1,第 3 组样本低亮度向高亮度迁移图像结果,见图 3。

图 3 显示:本文算法比 2-DHS 算法和 WGSF 算法所增强后的土壤图像亮度视觉效果更接近目标土壤图像。本文算法对直方图规定化中单映射算法的缺陷进行改进并融合土壤图像局部信息,保留原始土壤图像更多的亮度结构信息,因此本文算法的结果图像相比 2-DHS 算法和 WGSF 算法视觉效果更佳。第 3 组样本低亮度向高亮度迁移精度数据结果见表 3。

样本 1 的 10 组样本低亮度向高亮度迁移平均精度见表 4。

表 3 和表 4 显示:在亮度迁移精度实验中,本文算法的亮度迁移图像与目标图像在 V 分量的同一位置像素差异均值最小,且在全局亮度均值上更接近目标亮度;在 RGB 颜色校正精度实验上,因本文算法和 WGSF 算法都使用了色比不变性原理对土壤图像颜色进行校正,所以两算法颜色校正精度差距不大;而 2-DHS 算法仅增强图像 HSV 三分量中的 V 亮度分量,颜色平均精度低于本文算法和 WGSF 算法。

4.3.2 土壤图像从高向低亮度迁移实验结果及分析

在样本集 1 上使用本文算法、2-DHS 算法、WGSF 算法进行实验 2,第 5 组样本高亮度向低亮度迁移图像结果,见图 4。

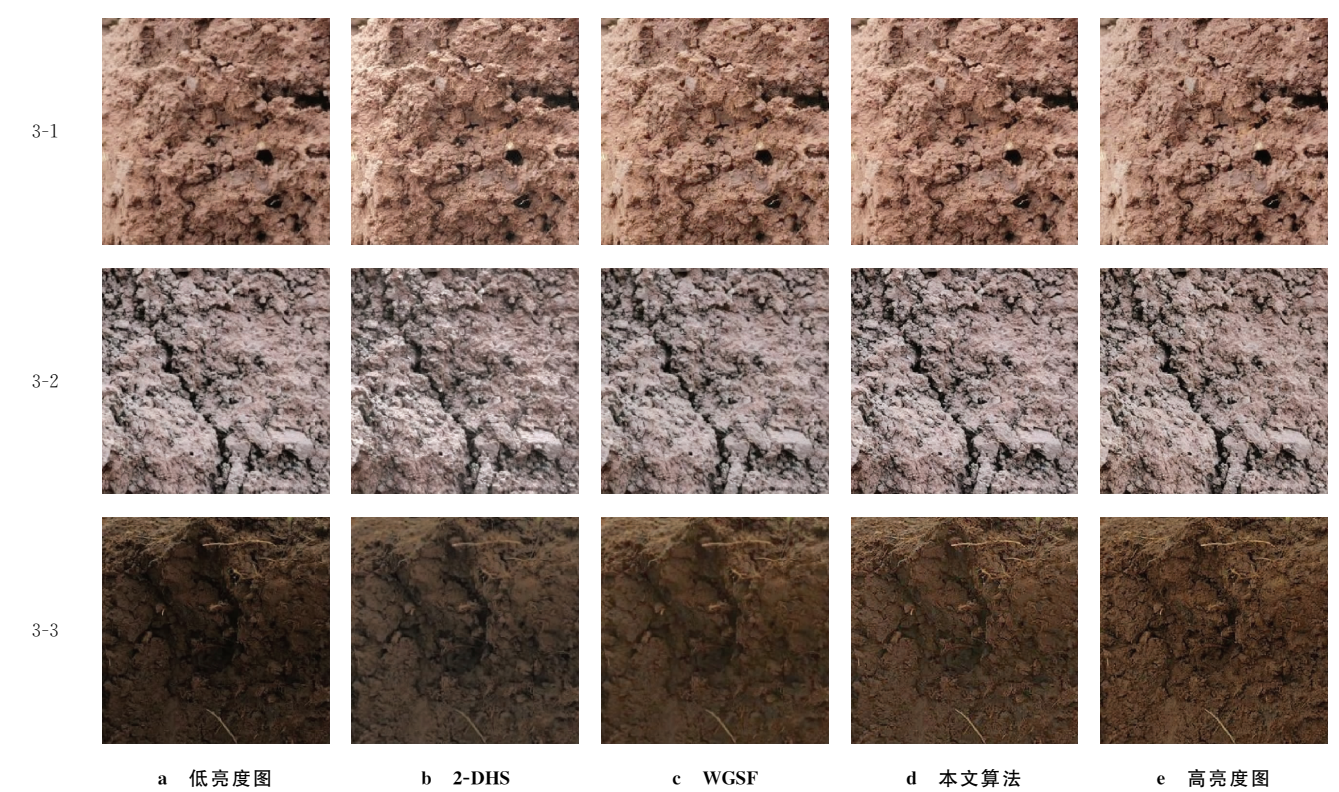


图 3 样本集 1(第 3 组)低亮度向高亮度迁移的图像结果

Fig. 3 Image results of low migrated to high brightness on sample set 1 (No. 3 group)

表 3 样本集 1(第 3 组)低亮度向高亮度迁移的增强精度

Tab. 3 Enhanced accuracy of images from low migrated to high brightness on sample set 1 (No. 3 group)							
子图	算法	$\overline{E}_V$	$\overline{E}_R$	$\overline{E}_G$	$\overline{E}_B$	$\overline{E}_{RGB}$	$ \mu_V - \mu_{target} $
3-1	2-DHS	11. 179 5	11. 178 3	11. 099 8	10. 785 4	11. 021 1	1. 148 2
	WGSF	9. 297 4	9. 296 3	9. 077 2	9. 196 0	9. 189 8	0. 497 8
	本文	8. 825 5	8. 824 5	8. 892 2	8. 732 6	8. 816 4	0. 462 4
3-2	2-DHS	14. 271 6	14. 270 5	13. 891 4	13. 752 8	13. 971 5	3. 280 3
	WGSF	10. 731 3	10. 731 5	10. 203 3	10. 500 6	10. 478 4	1. 714 1
	本文	10. 411 7	10. 411 9	10. 358 5	10. 887 4	10. 552 6	0. 449 8
3-3	2-DHS	12. 194 0	12. 194 2	9. 522 1	12. 285 4	11. 333 9	2. 512 1
	WGSF	11. 529 2	11. 529 0	9. 645 8	9. 282 2	10. 152 3	1. 459 3
	本文	10. 142 2	10. 141 8	9. 734 1	9. 712 5	9. 862 8	0. 378 6
均值	2-DHS	12. 548 3	12. 547 6	11. 504 4	12. 274 5	12. 108 8	2. 313 5
	WGSF	10. 519 3	10. 518 9	9. 642 1	9. 659 6	9. 940 1	1. 223 7
	本文	9. 793 1	9. 792 7	9. 661 6	9. 777 5	9. 743 9	0. 430 2

注: E_c 为亮度迁移图像与目标图像在 c 分量的相同位置像素上差的绝对值, c 分别表示土壤图像的 V 分量、 R 分量、 G 分量、 B 分量。 $|\mu_v - \mu_{target}|$ 表示亮度迁移图像与目标图像的 V 分量均值差异,下同。

图 4 显示:在高向低亮度迁移时,本文算法仍然比 2-DHS 算法和 WGSF 算法所增强后的土壤图像亮度视觉效果更接近目标土壤图像。第 5 组样本高亮度向低亮度迁移精度数据结果见表 5。

样本 1 的 10 组样本高亮度向低亮度迁移平均精度见表 6。

表 5、表 6 显示:在亮度迁移精度实验中,本文算法的亮度增强图像与目标图像同一位置像素差异均值仍然最小;在 RGB 颜色校正精度实验上,本文算法与 WGSF 算法颜色校正精度差距不大,且都优于 2-DHS 算法。

表 4 样本集 1 低亮度向高亮度迁移的平均精度

Tab. 4 Accuracy average of images from low migrated to high brightness on sample set 1

样本组	算法	$\overline{E}_V$	$\overline{E}_R$	$\overline{E}_G$	$\overline{E}_B$	$\overline{E}_{RGB}$	$ \mu_V - \mu_{\text{target}} $
1	2-DHS	12.495 9	12.495 0	12.610 9	12.778 6	12.628 1	2.504 6
	WGSF	10.350 9	10.350 7	9.783 0	10.413 0	10.182 2	2.557 6
	本文	9.788 3	9.788 3	10.650 0	11.365 8	10.601 3	0.318 1
2	2-DHS	12.721 1	12.721 0	12.343 6	12.625 6	12.563 4	3.845 4
	WGSF	11.168 3	11.168 3	10.581 4	11.071 6	10.940 4	4.271 8
	本文	10.433 6	10.433 7	11.472 5	12.081 5	11.329 2	0.095 1
3	2-DHS	12.548 3	12.547 6	11.504 4	12.274 5	12.108 8	2.313 5
	WGSF	10.519 3	10.518 9	9.642 1	9.659 6	9.940 2	1.223 7
	本文	9.793 1	9.792 7	9.661 6	9.777 5	9.743 9	0.430 2
4	2-DHS	13.534 7	13.506 2	14.041 6	14.303 2	13.950 3	1.278 9
	WGSF	11.840 3	11.840 2	11.270 3	11.803 7	11.638 0	1.318 5
	本文	11.107 6	11.107 5	11.853 3	12.764 8	11.908 5	0.117 4
5	2-DHS	13.231 8	13.230 0	13.642 9	14.108 6	13.660 5	1.894 4
	WGSF	10.719 9	10.718 0	11.591 4	12.282 4	11.530 6	1.328 0
	本文	10.584 1	10.914 5	11.981 9	12.616 9	11.837 7	0.202 5
6	2-DHS	14.147 8	14.115 8	14.490 8	14.489 8	14.365 4	1.025 1
	WGSF	11.444 1	11.424 6	12.010 1	12.143 2	11.859 3	1.374 0
	本文	11.222 3	11.516 7	12.251 6	12.337 8	12.035 3	0.247 5
7	2-DHS	13.053 0	13.052 7	13.239 0	13.782 8	13.358 1	1.822 9
	WGSF	10.897 7	10.898 8	11.157 7	11.262 0	11.106 1	0.657 3
	本文	10.302 6	10.302 7	11.714 7	12.939 7	11.652 3	0.371 8
8	2-DHS	13.301 3	13.301 7	13.531 5	13.719 6	13.517 6	2.377 6
	WGSF	11.040 9	11.042 8	11.496 0	11.737 3	11.425 3	0.545 1
	本文	11.032 3	11.133 8	12.028 8	12.588 4	11.917 0	0.277 0
9	2-DHS	12.267 5	12.267 4	12.394 0	13.054 9	12.572 1	2.634 8
	WGSF	10.730 3	10.729 8	10.778 6	11.118 7	10.875 7	1.453 0
	本文	10.636 6	10.636 2	11.276 1	11.433 6	11.115 3	0.107 9
10	2-DHS	13.550 9	13.551 2	12.132 6	13.807 2	13.163 6	6.679 3
	WGSF	11.617 6	11.618 2	10.594 1	11.334 9	11.182 4	5.238 1
	本文	10.366 5	10.367 0	10.855 9	12.224 5	11.149 1	0.284 1
均值	2-DHS	13.085 2	13.078 8	12.993 1	13.494 4	13.188 7	2.637 6
	WGSF	11.032 9	11.031 0	10.890 4	11.282 6	11.068 0	1.996 7
	本文	10.526 7	10.599 3	11.374 6	12.013 0	11.328 9	0.245 1

4.3.3 土壤图像亮度调节有效范围实验

在样本集 3 上使用本文算法进行实验 3,第 8 组样本以亮度均值为原点进行+10(或-10)逐级亮度迁移,不同迁移量下的亮度迁移图像结果见图 5。

第 8 组样本以亮度均值为原点进行+10 逐级亮度迁移的主观评价得分及有效范围见表 7。

表 7 显示:原点+10 到+20 时,所有图像得分为 1,此时没有人判定图像颜色失真;从原点+30 开始,部分

图像获得 0.8 分,表示有 1 人判定图像颜色失真;从原点+40 开始,部分图像有 2 人及以上判定颜色失真;原点+50 中,所有图像至少 3 人判定颜色失真;因此土壤图像从低亮度向高亮度迁移的亮度有效范围为[0,30]。

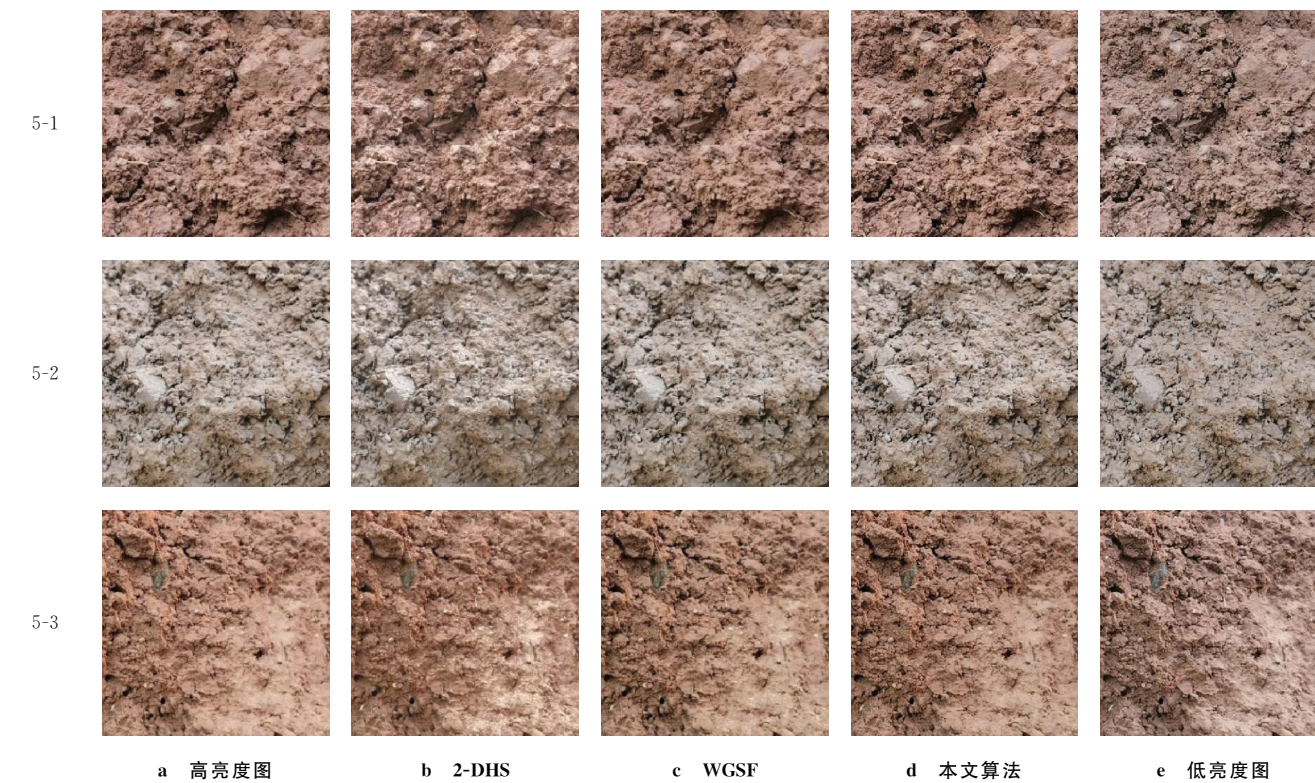


图 4 样本集 1(第 5 组)高亮度向低亮度迁移的图像结果

Fig. 4 Image results of high migrated to low brightness on sample set 1 (No. 5 group)

表 5 样本集 1(第 5 组)高亮度向低亮度迁移的增强精度

Tab. 5 Enhanced accuracy of images from high migrated to low brightness on sample set 1 (No. 5 group)

子图	算法	$\overline{E}_V$	$\overline{E}_R$	$\overline{E}_G$	$\overline{E}_B$	$\overline{E}_{RGB}$	$ \mu_V - \mu_{target} $
5-1	2-DHS	13.987 4	13.987 4	13.797 0	14.659 6	14.148 0	5.641 1
	WGSF	11.819 6	11.819 6	10.988 7	12.251 0	11.686 5	1.325 0
	本文	11.553 8	11.553 8	12.493 8	13.713 3	12.586 9	0.356 5
5-2	2-DHS	13.310 9	13.311 2	13.958 2	14.612 4	13.960 6	0.663 7
	WGSF	11.654 9	11.655 1	12.100 4	12.659 1	12.138 2	0.651 7
	本文	10.889 5	10.889 6	11.508 5	12.029 2	11.475 7	0.214 5
5-3	2-DHS	13.208 5	13.210 4	12.636 8	15.074 6	13.640 6	7.420 0
	WGSF	11.285 4	11.287 4	11.405 4	14.153 4	12.282 1	1.563 9
	本文	10.510 7	10.512 3	12.209 7	15.450 8	12.724 2	0.063 2
均值	2-DHS	13.502 3	13.503 0	13.464 0	14.782 2	13.916 4	4.574 9
	WGSF	11.586 6	11.587 3	11.498 1	13.021 1	12.035 6	1.180 2
	本文	10.984 6	10.985 2	12.070 6	13.731 1	12.262 3	0.211 4

第 8 组样本以亮度均值为原点进行-10 逐级亮度迁移的主观评价得分及有效范围见表 8。

表 8 显示:从原点-10 到原点-20 时,所有图像得分为 1,此时没有人判定图像失真;从原点-30 开始,部分图像获得 0.8 分,表示有 1 人判定图像颜色失真;原点-40 中,部分图像有 2 人及以上判定颜色失真;原点-50 中,所有图像至少 3 人判定颜色失真。因此土壤图像从高亮度向低亮度迁移的亮度有效范围为[-30,0]。

4.3.4 土壤图像向目标亮度迁移的精度实验

由 4.3.3 节所得土壤图像亮度迁移的有效范围 $[-30, 30]$,在样本集 2 上使用本文算法、2-DHS 算法、WGSF 算法进行实验 4,第 2 组样本以亮度均值为原点进行+10(或-10)逐级亮度迁移,在 $[-30, 30]$ 迁移量下的亮度迁移图像结果见图 6。

表 6 样本集 1 高亮度向低亮度迁移的平均精度
Tab. 6 Accuracy average of images from high migrated to low brightness on sample set 1

样本组	算法	$\overline{E}_V$	$\overline{E}_R$	$\overline{E}_G$	$\overline{E}_B$	$\overline{E}_{RGB}$	$ \mu_V - \mu_{\text{target}} $
1	2-DHS	11.883 0	11.883 7	11.303 4	11.503 2	11.563 4	1.880 8
	WGSF	9.773 9	9.774 9	9.634 8	10.285 0	9.898 2	2.414 9
	本文	9.626 0	9.625 1	9.960 0	10.889 3	10.158 1	0.202 4
2	2-DHS	12.855 1	12.855 2	12.663 5	13.183 8	12.900 8	3.306 7
	WGSF	11.269 5	11.269 7	10.690 9	11.271 4	11.077 3	4.137 7
	本文	10.407 2	10.407 2	11.364 7	11.994 4	11.255 4	0.225 3
3	2-DHS	10.775 7	10.775 7	10.935 1	11.427 1	11.045 9	2.249 0
	WGSF	11.606 7	11.606 8	11.458 4	12.124 7	11.729 9	3.014 6
	本文	11.153 8	11.153 9	12.019 7	12.904 8	12.026 1	0.116 5
4	2-DHS	13.851 9	13.862 4	14.382 6	14.317 5	14.187 5	1.997 7
	WGSF	10.902 4	10.854 0	11.720 8	11.832 9	11.469 2	0.645 7
	本文	10.520 4	10.483 4	11.441 1	11.603 6	11.176 0	0.300 7
5	2-DHS	13.502 3	13.503 0	13.464 0	14.782 2	13.916 4	4.574 9
	WGSF	11.586 6	11.587 3	11.498 1	13.021 1	12.035 5	1.180 2
	本文	10.984 6	10.985 2	12.070 6	13.731 1	12.262 3	0.211 4
6	2-DHS	13.059 3	13.063 4	13.361 9	13.751 2	13.392 1	1.574 6
	WGSF	10.808 3	10.806 0	11.436 2	11.834 5	11.358 9	1.554 7
	本文	10.666 6	10.663 2	11.358 2	11.869 6	11.297 0	0.414 0
7	2-DHS	13.130 3	13.132 1	12.681 5	12.868 4	12.894 0	3.607 2
	WGSF	11.278 2	11.277 3	11.452 5	11.567 9	11.432 5	0.666 4
	本文	11.063 3	11.062 0	11.209 5	11.352 3	11.207 9	0.421 6
8	2-DHS	13.534 6	13.536 4	13.433 0	13.620 6	13.530 0	2.397 2
	WGSF	11.304 9	11.306 0	11.617 7	11.712 4	11.545 3	0.708 1
	本文	11.260 5	11.261 8	11.508 8	11.650 1	11.473 5	0.346 7
9	2-DHS	12.447 2	12.447 4	11.834 1	12.056 8	12.112 7	4.276 1
	WGSF	10.952 7	10.952 6	11.233 7	11.372 4	11.186 2	0.580 4
	本文	10.973 5	10.973 7	11.061 2	11.259 2	11.098 0	0.400 2
10	2-DHS	13.528 0	13.529 6	11.791 4	12.956 4	12.759 1	6.355 3
	WGSF	11.255 1	11.255 9	10.435 5	10.769 8	10.820 4	2.790 1
	本文	10.774 5	10.774 9	10.784 6	11.373 3	10.977 6	0.082 3
均值	2-DHS	12.645 8	12.648 0	12.418 1	12.924 9	12.663 6	3.221 9
	WGSF	11.073 8	11.069 0	11.117 8	11.579 2	11.255 3	1.769 2
	本文	10.743 0	10.739 0	11.277 8	11.862 7	11.293 1	0.272 1

图 6 显示:各算法在原点-30 到原点+30 范围内亮度迁移中,2-DHS 算法结果图像出现明显失真;WGSF

算法随着亮度级差的增加,结果图像也出现过度增强,而本文算法几乎不失真。

第 2 组样本以亮度均值为原点进行+10 逐级亮度迁移,在 $[0,30]$ 迁移量下的亮度迁移精度数据结果见表 9。

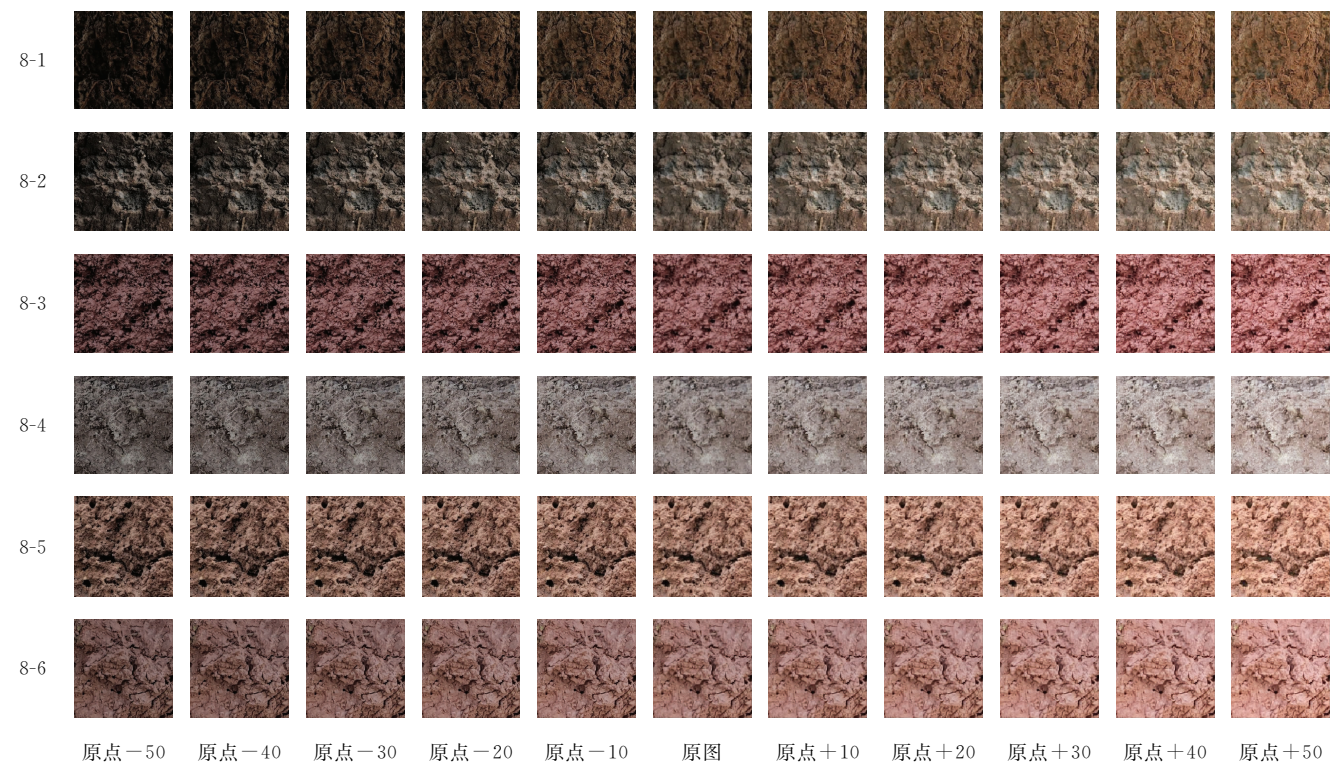


图 5 实验 3(第 8 组)亮度迁移的图像结果

Fig. 5 Image results of migrated brightness in experiment 3 (No. 8 group)

表 7 实验 3(第 8 组)低向高亮度迁移主观评价得分及有效范围

Tab. 7 Subjective evaluation point and effective range of images from low migrated to high brightness in experiment 3 (No. 8 group)							
子图	原点	原点+10	原点+20	原点+30	原点+40	原点+50	有效范围
8-1	72.563 7	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.600 0	0.200 0	$[0,30]$
8-2	95.469 5	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.800 0	0.200 0	$[0,30]$
8-3	124.569 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.400 0	$[0,40]$
8-4	131.956 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.400 0	$[0,40]$
8-5	143.288 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.400 0	$[0,30]$
8-6	148.200 0	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.400 0	0.200 0	$[0,30]$

注:原点表示土壤图像亮度均值,下同。

表 8 实验 3(第 8 组)高向低亮度迁移主观评价得分及有效范围

Tab. 8 Subjective evaluation point and effective range of images from high migrated to low brightness in experiment 3 (No. 8 group)

子图	原点	原点-10	原点-20	原点-30	原点-40	原点-50	有效范围
8-1	72.563 7	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.200 0	0.200 0	$[-30,0]$
8-2	95.469 5	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.400 0	0.200 0	$[-30,0]$
8-3	124.569 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.600 0	0.200 0	$[-30,0]$
8-4	131.956 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.400 0	$[-40,0]$
8-5	143.288 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.600 0	0.400 0	$[-30,0]$
8-6	148.200 0	1.000 0	1.000 0	0.800 0	0.600 0	0.600 0	$[-30,0]$

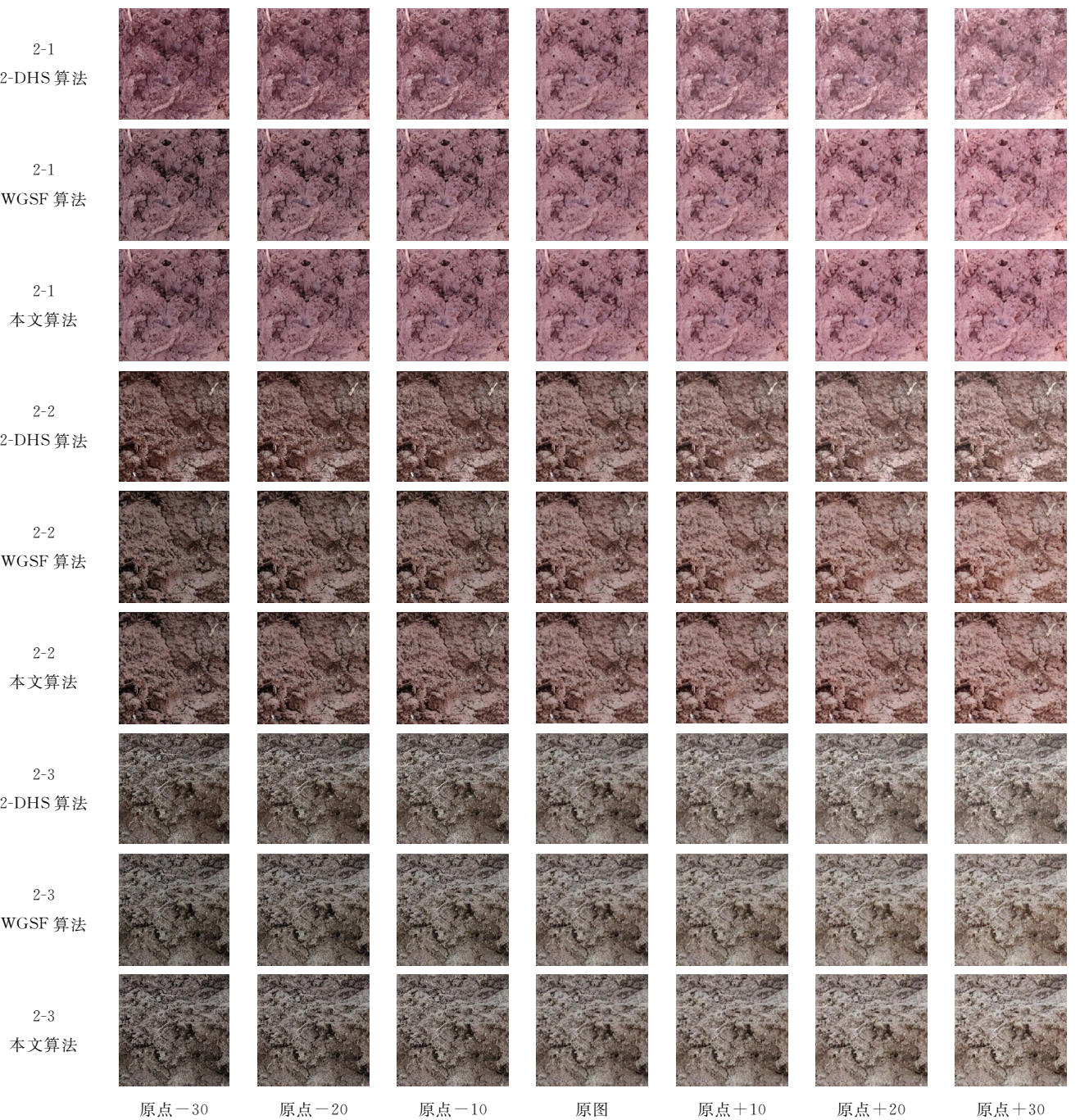


图 6 实验 4(第 2 组)亮度迁移的土壤图像

Fig. 6 Soil images of brightness migration in experiment 4 (No. 2 group)

表 9 实验 4(第 2 组)向高亮度迁移的土壤图像增强精度

Tab. 9 Enhanced accuracy of soil images migrating to high brightness in experiment 4 (No. 2 group)

子图	原点	原点+10			原点+20			原点+30		
		2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文
2-1	152.804	0.921 2	0.630 6	0.292 0	3.543 2	0.951 0	0.251 4	6.016 4	0.998 5	0.311 3
2-2	125.464	1.010 2	0.241 4	0.088 1	3.095 9	0.224 4	0.063 2	5.440 2	0.349 1	0.060 2
2-3	120.046	0.166 2	0.160 4	0.210 7	0.691 7	0.380 0	0.133 5	1.678 0	0.588 3	0.135 1
均值	—	0.699 2	0.344 1	0.196 9	2.443 6	0.518 4	0.149 3	4.378 2	0.645 3	0.168 8

样本 2 的 10 组样本以亮度均值为原点进行+10 逐级亮度迁移,在 $[0,30]$ 迁移量下的亮度迁移平均精度见表 10。

表 10 实验 4 样本集 2 向高亮度迁移的土壤图像增强平均精度
Tab. 10 Enhanced accuracy average of soil images migrating to high brightness in experiment 4 sample set 2

样本组	原点+10			原点+20			原点+30		
	2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文
1	0.597 9	0.297 7	0.353 6	2.463 1	0.118 2	0.380 6	4.591 4	0.087 3	0.395 6
2	0.699 2	0.344 1	0.196 9	2.443 6	0.518 4	0.149 3	4.378 2	0.645 3	0.168 8
3	0.975 0	0.666 9	0.285 3	1.881 1	1.580 4	0.226 6	2.672 1	2.574 5	0.439 7
4	0.407 2	0.651 8	0.164 6	0.860 2	1.517 6	0.330 3	2.140 7	2.319 5	0.319 7
5	0.681 0	0.473 2	0.310 6	1.294 2	1.001 7	0.258 7	2.745 8	1.840 5	0.271 7
6	1.473 7	0.220 2	0.364 2	3.895 8	0.837 0	0.305 0	6.723 3	1.690 7	0.314 6
7	1.582 7	0.740 2	0.203 4	4.563 1	0.885 9	0.171 3	7.668 1	1.132 5	0.189 4
8	2.147 3	0.818 0	0.277 0	4.859 5	0.638 0	0.274 8	7.758 7	0.589 7	0.417 1
9	0.794 8	0.242 2	0.263 8	2.754 2	0.196 2	0.240 2	4.992 0	0.379 2	0.230 8
10	1.065 0	0.292 4	0.309 7	3.839 0	0.505 4	0.268 3	6.718 6	0.902 9	0.328 5
均值	1.042 3	0.474 6	0.272 9	2.885 3	0.779 8	0.260 5	5.038 8	1.216 2	0.307 5

表 9 和表 10 显示:经本文算法向高亮度迁移图像的均值比 2-DHS 算法和 WGSF 算法更接近于目标亮度,表明本文算法在亮度迁移有效范围内,亮度迁移精度较高,效果优于对比算法。

第 2 组样本以亮度均值为原点进行-10 逐级亮度迁移,在 $[-30,0]$ 迁移量下的亮度迁移精度数据结果见表 11。

表 11 实验 4(第 2 组)向低亮度迁移的土壤图像增强精度
Tab. 11 Enhanced accuracy of soil images migrating to low brightness in experiment 4 (No. 2 group)

子图	基点	原点-10			原点-20			原点-30		
		2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文
2-1	152.804 0	1.028 0	1.722 1	0.297 3	2.079 0	1.963 3	0.295 6	2.150 0	1.768 8	0.371 4
2-2	125.464 0	0.887 0	2.616 0	0.280 0	2.074 0	3.585 0	0.266 3	4.080 6	3.880 1	0.369 3
2-3	120.046 0	0.634 0	1.546 0	0.336 3	1.587 0	1.632 7	0.284 2	3.075 1	1.594 6	0.419 9
均值	—	0.849 6	1.961 3	0.340 5	1.913 3	2.393 6	0.282 0	3.101 9	2.414 5	0.386 8

样本 2 的 10 组样本以亮度均值为原点进行-10 逐级亮度迁移,在 $[-30,0]$ 迁移量下的亮度迁移平均精度见表 12。

表 11 和表 12 显示:经本文算法向低亮度迁移的图像均值比 2-DHS 算法和 WGSF 算法更接近目标亮度,表明本文算法在亮度迁移有效范围内,亮度迁移精度较高,效果优于对比算法。

4.3.5 算法平均迭代次数和运行时间比较实验

在 4.3.3 节所得土壤图像亮度迁移有效范围内,基于样本集 2,比较本文算法与 2-DHS 算法、WGSF 算法将土壤图像从原始亮度迁移到目标亮度的平均迭代次数运行时间。

图 7 显示:样本集 2 在亮度有效范围内进行迁移,本文算法每张图像迭代次数范围为 3~5 次,WGSF 算法每张图像迭代次数范围 6~8 次;

图 8 显示:样本集 2 在亮度有效范围内进行迁移,本文算法每张图像运行时间范围为 4~7 s,样本集 2 上平均运行时间为 5.54 s;WGSF 算法每张图像运行时间范围为 4~6 s,样本集 2 上平均运行时间为 4.73 s。WGSF 算法通过逐步求差方式使用多个高斯曲线拟合土壤图像直方图,仅需对一维直方图左部不断拟合,拟合次数较

多,拟合后后续计算较少,算法总时间复杂度低;本文算法拟合次数减少,增加了后续异常点校正,时间复杂度达到 $O(n^3)$ 。虽然 WGSF 算法的平均运行时间优于本文算法,但本文解决映射块效应问题方法更有效;而 2-DHS 算法由于使用二维直方图规定化,灰度映射的组合多,算法较为复杂,每张图像运行时间范围为 5~8 s,平均运行时间为 6.53 s,结果相较于本文算法以及 WGSF 算法都高。

表 12 实验 4 样本集 2 向低亮度迁移的土壤图像增强平均精度

Tab. 12 Enhanced accuracy average of soil images migrating to low brightness in experiment 4 sample set 2

样本组	基点-10			基点-20			基点-30		
	2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文	2-DHS	WGSF	本文
1	3.270 6	0.823 6	0.334 8	3.463 5	1.975 2	0.301 6	3.566 0	1.296 6	0.772 7
2	0.849 6	1.961 3	0.340 5	1.913 3	2.393 6	0.282 0	3.101 9	2.414 5	0.386 8
3	1.782 9	1.444 6	0.388 3	2.521 4	2.081 0	0.313 1	3.541 2	2.912 2	0.364 0
4	1.176 6	0.874 1	0.494 6	1.396 2	2.406 4	0.459 5	2.182 4	2.581 3	0.602 5
5	0.873 7	1.696 5	0.318 3	1.698 2	2.656 6	0.600 9	3.422 1	1.916 7	0.394 2
6	2.024 1	2.112 4	0.388 7	2.850 5	2.337 4	0.343 4	2.810 0	2.306 1	0.441 1
7	3.258 7	1.016 4	0.197 4	5.056 7	1.115 1	0.290 1	5.825 0	0.921 5	0.333 6
8	2.469 6	1.972 9	0.402 6	3.661 9	2.107 2	0.705 3	4.483 9	1.466 8	0.323 4
9	2.605 0	0.767 4	0.340 2	3.652 7	1.577 3	0.331 7	4.192 4	1.381 7	0.351 5
10	3.418 6	0.688 6	0.231 5	5.099 6	0.946 8	0.274 3	6.015 3	0.683 2	0.368 5
均值	2.172 9	1.335 7	0.343 6	3.131 4	1.959 6	0.390 1	3.914 0	1.788 0	0.433 8

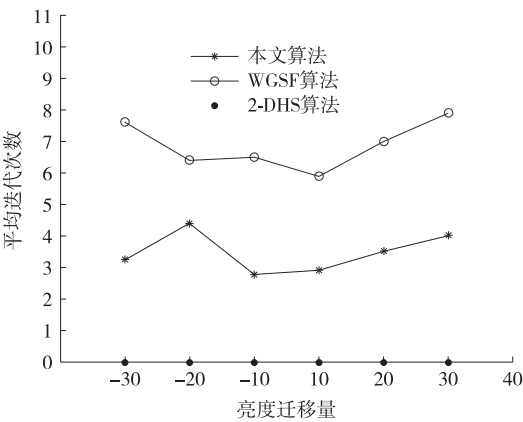


图 7 不同算法下的平均迭代次数
Fig. 7 The averages of iteration for different algorithms

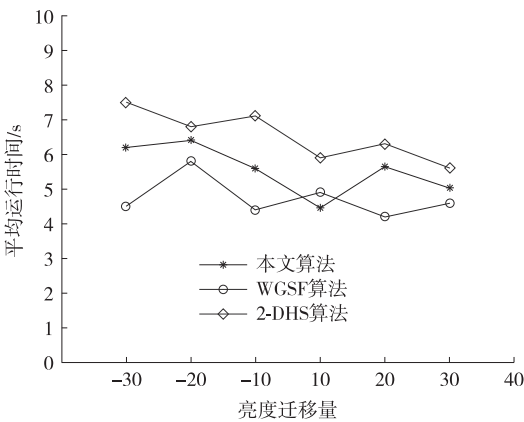


图 8 不同算法下的平均运行时间
Fig. 8 The averages of running time for different algorithms

5 结论

本文提出的非对称广义高斯亮度迁移与局部信息融合的土壤图像亮度可控增强算法,实现土壤图像亮度可控迁移。

1) 本文使用非对称广义高斯拟合土壤图像 V 分量直方图,保持了土壤图像亮度直方图的偏态分布特性并降低直方图拟合的复杂性;将目标迁移量引入拟合曲线并作为规定化中的目标直方图,实现了对土壤图像亮度的控制;对直方图规定化映射算法产生的有异常点的迁移直方图进行校正,减小了块效应给土壤图像质量造成的影响。

2) 利用土壤图像 V 分量亮度信息估计图像局部光照权重,引入目标亮度,根据该权重确定局部亮度增量,并将局部亮度增量叠加到原始 V 分量,使增强后的图像的局部光照信息与原图保持一致,实现基于局部增量的土壤图像亮度可控增强。

3) 将非对称广义高斯亮度迁移得到的全局亮度增强结果与基于局部增量的亮度增强结果进行融合,在保证土壤图像达到目标亮度得同时,使得增强图像的局部亮度更接近真实环境下采集的土壤图像;在图像色彩方面,使用色比不变性原理对分别图像 R 、 G 、 B 分量进行校正,较好地还原土壤图像颜色。

本文通过仿真实验证明了提出的算法是有效的,实验结果显示:土壤图像亮度可控增强精度较高,且增强后的图像接近真实环境下采集的目标图像;经过主观评价得出 $[-30, 30]$ 为土壤图像亮度迁移有效范围,并且在有效范围内,实现较高精度的亮度迁移。但本文算法在颜色校正方面仍需进步,增强图像的颜色与真实目标图像颜色有一定差异,此外算法的复杂度较高且亮度迁移有效范围较小,仍需今后进一步研究。

参考文献:

- [1] WANG Y, WANG H, YIN C, et al. Biologically inspired image enhancement based on Retinex[J]. *Neurocomputing*, 2016, 177 (177): 373-384.
- [2] GAO Y, HU H M, LI B, et al. Naturalness preserved nonuniform illumination estimation for image enhancement based on Retinex[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 20(2): 335-344.
- [3] 李赓飞, 李桂菊, 韩广良, 等. 亮通道先验 Retinex 对低照度图像的光照补偿[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1191-1200.
LI S F, LI G J, HAN G L, et al. Illumination compensation using Retinex model based on bright channel prior[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1191-1200.
- [4] FU Q, JUNG C, XU K. Retinex-based perceptual contrast enhancement in images using luminance adaptation[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 61277-61286.
- [5] 席佳祺, 陈晓冬, 汪毅, 等. 细节保持的非均匀光照图像亮度均衡算法[J]. *光电工程*, 2019, 46(4): 47-58.
XI J Q, CHEN X D, WANG Y, et al. Details preserved brightness equalization algorithm for non-uniform illumination images [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 47-58.
- [6] SINGH N, BHANDARI A K. Principal component analysis based low light image enhancement using reflection model[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021(99): 1-1.
- [7] FU X, ZENG D, HUANG Y, et al. A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images[J]. *Signal Processing*, 2016, 129: 82-96.
- [8] TOHL D, LI J S J. Image enhancement by s-shaped curves using successive approximation for preserving brightness[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2017, 24(8): 1247-1251.
- [9] LI C, LIU J, LIU A, et al. Global and adaptive contrast enhancement for low illumination gray images[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 163395-163411.
- [10] WANG W, CHEN Z, Yuan X, et al. Adaptive image enhancement method for correcting low-illumination images [J]. *Information Sciences*, 2019, 496: 25-41.
- [11] LI C, TANG S, YAN J, et al. Low-light image enhancement via pair of complementary gamma functions by fusion[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 169887-169896.
- [12] SIMI V R, EDLA D R, JOSEPH J, et al. Parameter-free fuzzy histogram equalization with illumination preserving characteristics dedicated for contrast enhancement of magnetic resonance images [J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 93: 106364.
- [13] BHANDARI A K, MAURYA S. Cuckoo search algorithm-based brightness preserving histogram scheme for low-contrast image enhancement[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(3): 1619-1645.
- [14] 兰蓉, 贾亚雯. 自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 2919-2928.
LAN R, JIA Y W. Adaptive intuitionistic fuzzy dissimilar histogram clipping image enhancement algorithm[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(12): 2919-2928.
- [15] VELUCHAMY M, SUBRAMANI B. Fuzzy dissimilarity color histogram equalization for contrast enhancement and color correction[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 89: 106077.
- [16] 毕秀丽, 邱雨檬, 肖斌, 等. 基于统计特征的图像直方图均衡化检测方法[J]. *计算机学报*, 2021, 44(2): 292-303.
BI X L, QIU Y M, XIAO B, et al. Histogram equalization detection based on statistical features in digital image[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(2): 292-303.
- [17] SEN D, PAL S K. Automatic exact histogram specification for contrast enhancement and visual system based quantitative evaluation[J]. *IEEE Transactions on image processing*, 2010, 20(5): 1211-1220.

- [18] NIKOLOVA M, STEIDL G. Fast ordering algorithm for exact histogram specification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(12): 5274-5283.
- [19] 赵通, 王国胤, 肖斌. 基于多峰高斯函数的直方图规定化算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 245-250.
ZHAO T, WANG G Y, XIAO B. Image specification algorithm based on multi-peaks Gaussian function[J]. Computer Science, 2014, 41(12): 245-250.
- [20] LIU H D, YANG M, GAO Y, et al. Local histogram specification for face recognition under varying lighting conditions[J]. Image and Vision Computing, 2014, 32(5): 335-347.
- [21] XIAO B, TANG H, JIANG Y, et al. Brightness and contrast controllable image enhancement based on histogram specification[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 2798-2809.
- [22] 曾绍华, 赵秉渝, 王帅, 等. 加权高斯减法拟合的亮度可控土壤图像增强[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 356-375.
ZENG S H, ZHAO B Y, WANG S, et al. Controllable brightness enhancement of the soil image based on weighted gaussian subtraction fitting[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 356-375.
- [23] SHARIFI K, LEON-GARCIA A. Estimation of shape parameter for generalized Gaussian distribution in subband decomposition of video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, 5(1): 52-56.
- [24] GONZALEZ R C, WOODS R E. Image enhancement in the spatial domain[J]. Digital image processing, 2002, 2: 70-80.
- [25] 重庆市农业技术推广总站, 西南大学, 重庆土壤学会. 重庆市地方标准 DB50/T 796—2017: 重庆土壤分类与代码[S]. 重庆: 重庆市质量技术监督局, 2017: 9.
Chongqing Master Station of Agricultural Technology Promotion, Southwest University, Soil Science Society of Chongqing. Chongqing local standard DB50/T 796-2017: Classification and codes for Chongqing soil[S]. Chongqing: Chongqing Bureau of Technical Supervision, 2017: 9.

Soil Images Enhancement of Integrating Brightness Migration Based on Asymmetric Generalized Gaussian and Spatial Information

DENG Yi^{1,2}, ZENG Shaohua^{1,2}, ZHAN Linqing³, CHEN Yanan⁴, LIU Guoyi⁵

(1. College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University;

2. Chongqing Research Center on Engineer Technology of Digital Agricultural & Services, Chongqing 401331;

3. Chongqing Master Station of Agricultural Technology Promotion, Chongqing 401121; 4. Wanzhou District

Station of Soil Fertilizer and Agricultural Ecological Protection, Chongqing 404199; 5. Institute of Agricultural

Resources and Environment, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China)

Abstract: [Purposes] To reduce the accuracy influence that machine vision identifies soil species under the different imaging conditions, a soil image is adjusted to approximate closely a real soil image that is captured under specific natural illumination and its brightness is rated. A controlled brightness enhancement is proposed for soil images which are collected in the field environment. [Methods] Firstly, asymmetric generalized Gaussian curve is utilized to fit the V component histogram of the soil images, and the target migration value is introduced into the fitted curve to accomplish the brightness migration of images, which realizes the brightness controllable enhancement of soil images based on the global. Then the global and local information are applied to estimate the brightness weight of an image in the spatial region. According to the weight and a given target brightness, the local increment is determined and superimposed to the original V component of the soil image to achieve its brightness enhancement. Next, the global brightness migration result of asymmetric generalized Gaussian curve is fused with the brightness enhancement result based on the local increment by taking advantage of the sigmoid curve. Finally, in accordance with the principle of color ratio invariance, the R , G and B components of the original soil image are corrected separately. [Results] Experiment results demonstrate that the brightness absolute difference average of corresponding pixel between the enhanced image and the target image on the V component is 10.526 7, and its arithmetic mean is 0.245 1. The above indicators are 10.743 0 and 0.272 1 respectively when weakening brightness. The proposed algorithm can control image brightness with higher accuracy than other algorithms. Subjective evaluation illustrates that the effective range of soil image brightness enhancement is $[-30, 30]$. [Conclusions] The simulation result proves that proposed method is effective for controllable brightness enhancement of soil image.

Keywords: image enhancement; controllable brightness; soil image; histogram specification; machine vision

(责任编辑 黄 颖)