

基因表达式编程优化的色调保持低照度图像增强

贾新宇¹, 李婷婷¹, 江朝晖^{1,2*}, 刘海秋¹, 饶元^{1,2}

¹安徽农业大学信息与计算机学院, 安徽 合肥 230036;

²农业部农业物联网技术集成与应用重点实验室, 安徽 合肥 230036

摘要 提出了一种基因表达式编程寻优的色调对比度增强算法。选用多幅低照度图像作为参考图像, 将该方法与自适应直方图均衡化、同态滤波、多尺度 Retinex 和带颜色恢复的多尺度 Retinex 等方法的实验结果进行了比较。所提算法的峰值信噪比、结构相似度和基于局部方差质量指数的平均值分别为 25.93、0.75 和 0.87, 均优于其他算法, 在主观上亮度和对比度都更自然, 更符合人眼视觉特性。该算法可广泛适用于低照度环境下的机器视觉领域。

关键词 机器视觉; 图像增强; 基因表达式编程; 低照度

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.091502

Hue Preserving Low Illumination Image Enhancement Based on Gene Expression Programming Optimization

Jia Xinyu¹, Li Tingting¹, Jiang Zhaohui^{1,2*}, Liu Haiqiu¹, Rao Yuan^{1,2}

¹School of Information & Computer, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;

²Key Laboratory of Technology Integration and Application in Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Hefei, Anhui 230036, China

Abstract A hue contrast enhancement algorithm based on gene expression programming optimization is proposed. A number of low illumination images are selected as the reference images and the results are compared with those of the adaptive histogram equalization, homomorphic filtering, multiscale Retinex enhancement, and color-restored multiscale Retinex enhancement. The average values of the peak signal-to-noise ratio, structural similarity and quality index based on local variance of the proposed algorithm are 25.93, 0.75, and 0.87, respectively, which are better than the other algorithms. Subjectively, the brightness and contrast of images processed by the propose method are more natural and more in line with human visual characteristics. The proposed algorithm can be widely applied to the field of machine vision in low illumination environments.

Key words machine vision; image enhancement; gene expression programming; low illumination

OCIS codes 150.1135; 100.2980

1 引言

随着计算机和图像处理技术的发展, 机器视觉技术的应用领域越来越广泛^[1]。但在图像采集过程中, 光照、天气和林木遮挡等因素会对采集到的图像造成干扰, 使得借用手机、摄像机、无人机^[2]等设备采集到的图像出现光照不均、模糊等现象, 产生低照

度图像。这一类图像不仅会给人带来视觉上的不适, 也会给后续的图像识别、分割等工作带来极大的挑战。这就迫切需要对低照度图像进行图像增强的预处理操作。

近年来, 国内外学者已经就低照度图像增强算法做了大量研究。针对基于滤波器的方法^[3-5], 文献^[3]将原始图像在空间频域划分为几个尺度的子图

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2018-11-06; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0600101)、原农业部农业物联网技术集成与应用重点实验室开放基金(2016KL01)

* E-mail: jiangzh@ahau.edu.cn

像,通过对高频子带图像使用不同的同态滤波函数进行增强;文献[4-5]在滤波的基础上,使用多尺度Retinex算法对原始图像进行增强。这些方法虽然可以增强图像的一些特定指标,但会滤除图像中的某些灰度级,从而丢失一些图像信息,不能较好地满足人们的使用要求。近年来,彩色图像的色调保持技术得到了广泛研究。文献[6]提出了一种使用最优线性变换进行色调保持的彩色图像增强方法;文献[7]提出了一种高饱和度的保色域映射方法,增强后的图像质量较高,色彩保持较好。

还有部分学者尝试使用基于直方图的增强方法^[8-10],其中,文献[8]对原始图像进行改进直方图均衡化增强,提取低频分量进行直方图均衡化,然后与高频分量融合;文献[10]提出了基于直方图的局部保持对比度增强算法。但是以上方法的自适应度较差,参数需要人为调整,而且并不能完全避免直方图峰值图像上出现的过度增强和非自然伪影,会改变图像的平均亮度,从而降低边缘和细节。目前,将粒子群算法^[11]、人工蜂群算法^[12-13]等智能仿生算法应用于低照度图像增强领域已经成为一种较新的思想。上述算法虽然可以对增强过程中需要使用的最优参数进行搜索寻优,但是容易陷入局部最优解,导致算法的运行时间大幅增加。

为解决传统方法自适应较差和容易陷入局部最优解的问题,本文提出了在全局对比度增强的基础上用基因表达式编程来寻找最优对比度参数的方法。基因表达式编程(GEP)算法是借鉴生物遗传的基因表达规律提出的搜索和知识发现的新技术,它在遗传算法和遗传编程的基础上发展而来,通过模拟生物遗传进化的方式寻找问题的最优解^[14-15]。GEP算法凭借其处理问题灵活、搜索能力强等优点,在寻优问题上具有优良性能^[16-17]。通过基因表达式编程获取到最优对比度参数后,再结合色调保持技术,可以实现对光照不足条件下获取的低照度图像亮度的增强,同时尽可能还原图像色度。

2 方 法

2.1 算法描述

本文算法主要涉及两个步骤:基因表达式编程寻优的对比度增强和色调保持理论的色调增强。对于传统的直方图均衡化增强,在增强过程中大量灰度级被合并,会造成不自然的视觉效果。因此在计算出灰度图像的直方图后,提出利用基因表达式编

程寻优求取直方图参数 μ 的最优值,从而获取对比度增强所需的最优映射函数。与此同时,对低照度图像的像素值进行线性延展,将低照度图像转换为相应的强度图像,利用获取的映射函数对转换后的强度图像进行对比度增强,最后结合色调保持增强理论得到最终的增强图像。

综上,使用基因表达式编程寻优的图像增强算法流程图如图1所示。

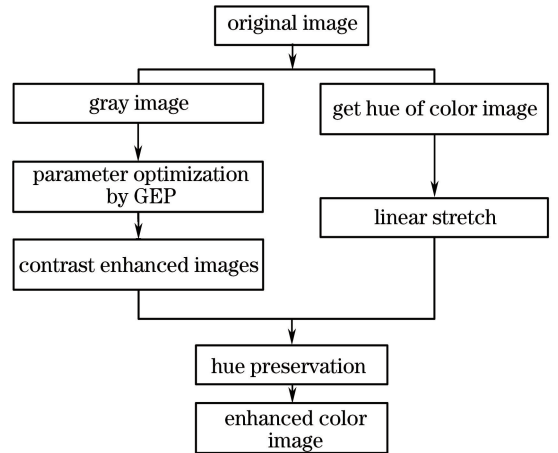


图1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm

2.2 基于GEP寻优的对比度增强

全局对比度增强方法是一种基于图像直方图的算法,主要目标是获得用于修改像素值和增强所处理图像对比度的相应映射函数^[18]。传统的直方图均衡算法使用图像的原始直方图来获得映射函数,灰度图像 G 的映射函数 T 为

$$T(i) = \text{Floor} \left[(L-1) \sum_{j=0}^i h_G(j) + 0.5 \right], \quad (1)$$

式中: L 作为灰度图像中的灰度等级,取值为256; $h_G(j)$ 为图像 G 的归一化灰度直方图; $i, j \in [0, L-1]$ 是映射函数 T 的输入整数;Floor表示向下取整。

传统的直方图均衡方法往往会使得增强后的图像出现视觉伪影现象。为解决该问题,借鉴文献[19]通过获取最优直方图进而获得映射函数来改善图像增强的效果。最优直方图 \hat{h} 需要尽可能接近归一化均匀直方图 h_U 并且拥有较小的残差,表示为

$$\hat{h} = \text{argmin}(\|h - h_G\| + \mu \|h - h_U\|), \quad (2)$$

式中: h 表示图像的直方图;argmin表示最小残差的集合; $\|\cdot\|$ 表示范数; μ 是用于控制直方图的参数,其取值直接影响增强图像的效果。本文使用GEP算法对参数 μ 寻优,找出最优直方图。

GEP算法是一种模仿基因表达与进化过程的求解方法,它的处理对象是单基因或多基因组成的染色体。本文将灰度值、灰度分布及参数 μ 编码成染色体,采用组合方式创建一定数量的初始种群,随后使用选择、变异、插串三种遗传算子对染色体进行操作。

本文的基因表达式编程参数设置如下:初始种群大小为30,基因变异率为0.05,基因插串率为0.25。在对参数测试期间,发现初始种群的最佳范围在30~50,较小的种群数会导致寻优过程中迭代次数增多,而较大的种群数会导致运算时间过长。基因变异率取值在小于0.1时结果会保持相对稳定。基因插串率的取值则是以0.2~0.3为最佳。

鉴于寻找最优直方图的目的在于保证图像增强到最佳程度,采用映射函数 T 的色调失真情况来衡量参数 μ 的效果。定义GEP的适应度函数为

$$f(T) = \max_{0 \leq j \leq i \leq L-1} \{i - j; T(i) = T(j), h_G(i) > 0, h_G(j) > 0\}, \quad (3)$$

式中: $f(T)$ 表示适应度函数; $T(i)$ 表示灰度图像的映射函数; L 取值为256。

适应度函数值越小,表示增强后的图像色调失真越小,色调越平滑。通过适应度函数控制色调失真来选择最佳的参数 μ ,进而产生最优的修正直方图和最终的映射函数,用映射函数来自适应地增强图像。

2.3 基于色调保持理论的色度增强

使用基因表达式编程找到最佳亮度后,再使用

色调保持理论对图像的颜色进行恢复^[20]。在色调保持理论中,RGB颜色空间下图像中值为 (r, g, b) 的像素点 x 的色调定义为

$$h(x) = \begin{cases} 0, & r = g = b \\ \theta, & b \leq g \\ 2\pi - \theta, & b > g \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $h(x)$ 的范围为 $[0, 2\pi]$; θ 是色调的角度坐标,表示与红色之间的偏离度。

$$\theta = \arccos \frac{\frac{1}{2} [(r - g) + (r - b)]}{[(r - g)^2 + (r - b)(g - b)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

式中: \arccos 表示反余弦函数。

为了实现色调对比度增强,先通过下式将低照度图像 X 的像素值范围线性延展至 $[0, L - 1]$ 。

$$\hat{X} = (L - 1) \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (6)$$

式中: \hat{X} 表示线性拉伸后的彩色图像; X_{\min} 和 X_{\max} 分别为图像 X 三个颜色通道的最小和最大强度值,在8位图像中 L 取值为256。

线性延展后的图像通过下式得到相应的强度图像 I 。

$$I = 0.299\hat{X}_r + 0.587\hat{X}_g + 0.114\hat{X}_b, \quad (7)$$

式中: \hat{X}_r 、 \hat{X}_g 、 \hat{X}_b 分别代表对 (r, g, b) 三个颜色空间分量进行线性延展。

对 I 使用对比度增强处理后得到的增强图像记为 I' ,并计算得到最终的增强图像 Y 。

$$Y(x) = \begin{cases} \frac{I'(x)}{I(x)} \hat{X}(x), & \frac{I'(x)}{I(x)} \leq 1 \\ \frac{L - 1 - I'(x)}{L - 1 - I(x)} [\hat{X}(x) - I(x)] + I'(x), & \frac{I'(x)}{I(x)} > 1 \end{cases}. \quad (8)$$

3 实验及结果分析

为了测试本文算法对低照度图像增强的有效

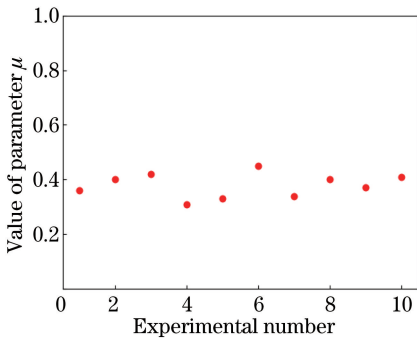


图2 实验对象。(a)玉米;(b)番茄;(c)竹子1;(d)竹子2

Fig. 2 Experimental objects. (a) Corn; (b) tomato; (c) bamboo 1; (d) bamboo 2

性,收集了大量低照度和低对比度图像用于测试。首先随机选取了4幅图像进行实验,包括玉米、番茄和竹子图像,如图2所示。

对于实验中控制直方图参数 μ 的寻优,本文进行了多次实验,参数的寻优结果如图3所示。对获取的多组实验参数 μ 求取平均值。在后续整个实验中,本文算法的参数 μ 值均设置为0.37。

图3 控制直方图参数 μ Fig. 3 Control histogram parameter μ

将本文算法与自适应直方图均衡化 (CLAHE) 算法、同态滤波 (HF) 算法、多尺度 Retinex (MSR) 算法^[3]、带颜色恢复的多尺度 Retinex (MSRCR) 算法^[21] 的实验结果进行比较。实验所用软件为 Matlab R2016 b, 操作系统为 Windows 7, 处理器为 Intel i5-4590, 主频 3.30 GHz, 内存 8.00 GB。图 4 展示了本文算法与以上 4 种算法的比较结果。

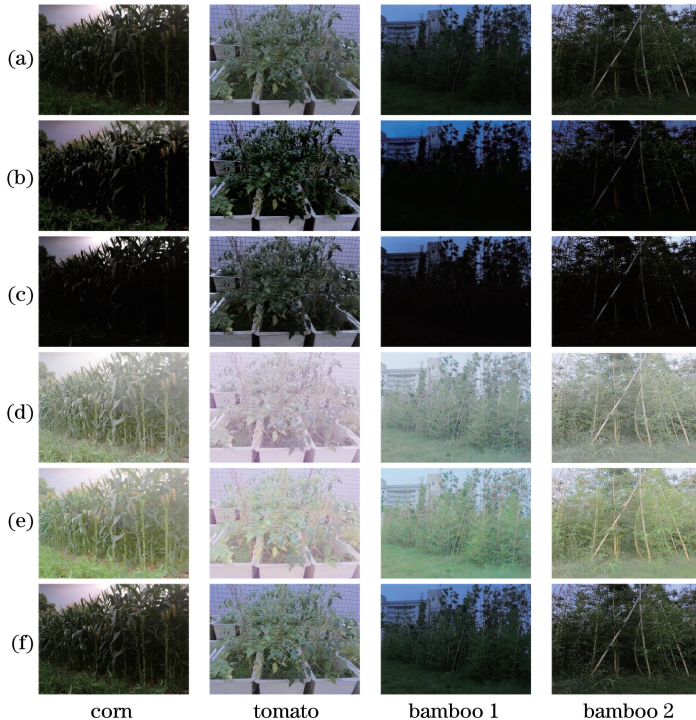


图4 不同算法处理的低照度图像对比。(a)原始图像;(b) CLAHE 算法;(c) HF 算法;
(d) MSR 算法;(e) MSRCR 算法;(f)本文算法

Fig. 4 Comparison of low illumination images processed by different algorithms. (a) Original images; (b) CLAHE algorithm; (c) HF algorithm; (d) MSR algorithm; (e) MSRCR algorithm; (f) proposed algorithm

3.2 客观评价

为了客观评价不同算法对低照度图像的增强效果,给出一组全参考的图像质量评价指标比较:峰值

3.1 主观评价

从图 4 的实验结果可以看出,由于 CLAHE 算法将原始图像直方图转换为各灰度级均匀分布的形式,处理后的图像会出现细节丢失的现象。如 CLAHE 算法处理后的玉米图像的右上角植株叶片部分,虽然亮度提高,但是出现了失真现象,减弱了叶片之间的对比度,失去了不同叶片之间亮暗的层次感。HF 算法处理后的图像整体较暗,对比度较低。如图 4 中 HF 算法处理后的竹子 1 图像,竹子与地面颜色一致,难以区分。MSR 和 MSRCR 算法通过降低或者去除入射光对反射光的影响来实现图像增强。增强后的图像整体亮度会有明显提高,但是极可能会出现严重的光晕问题。如图 4 中 MSRCR 算法处理后的竹子 2 图像,其左下部分有严重的伪影,处理后的番茄图像甚至出现了严重的伪彩色问题,导致视觉效果很差。本文算法通过基因表达式编程获取最优的对比度参数,在抑制光晕和克服色彩失真上表现较好,在提升亮度的同时,图像边缘细节信息也能得到较好的保留,具有相对较好的视觉效果。

信噪比 (PSNR)、基于结构失真的视频质量客观评价方法 (SSIM),以及在 SSIM 基础上提出的基于局部对比度的质量评价方法 (QILV)^[22]。PSNR 基于

图像像素灰度值来统计分析,其值越大,表示失真越小;SSIM 考虑了图像的亮度、对比度和结构信息,取值范围为 $[0,1]$,其值越大,表示图像质量越高;

QILV 能够有效地评价增强后图像的失真程度,其值越大,说明失真度越小。不同算法的评价指标值如表 1 所示。

表 1 不同算法下增强图像的客观评价结果

Table 1 Objective evaluation results of enhanced images under different algorithms

Test image	Evaluation index	Enhanced algorithm				
		CLAHE	HF	MSR	MSRCR	Proposed
Corn	PSNR	26.57	26.11	12.01	12.18	27.79
	SSIM	0.53	0.47	0.33	0.34	0.70
	QILV	0.75	0.91	0.25	0.25	0.93
Tomato	PSNR	20.82	23.48	12.47	12.71	24.44
	SSIM	0.64	0.85	0.65	0.64	0.85
	QILV	0.81	0.85	0.46	0.45	0.89
Bamboo 1	PSNR	26.44	26.87	11.39	11.78	28.27
	SSIM	0.47	0.54	0.35	0.36	0.71
	QILV	0.69	0.84	0.12	0.13	0.90
Bamboo 2	PSNR	22.16	25.35	11.50	11.83	27.03
	SSIM	0.32	0.48	0.35	0.36	0.68
	QILV	0.12	0.76	0.14	0.14	0.88

为排除单个图像对算法评价指标的影响,采用多批箱线图绘制不同算法处理的 23 幅低照度图像的 PSNR、SSIM 和 QILV 评价指标,分别如图 5~7 所示。

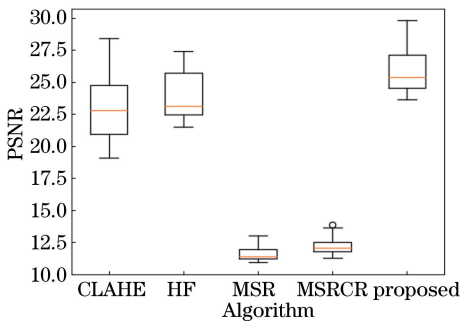


图 5 不同算法的 PSNR 对比

Fig. 5 Comparison of PSNR under different algorithms

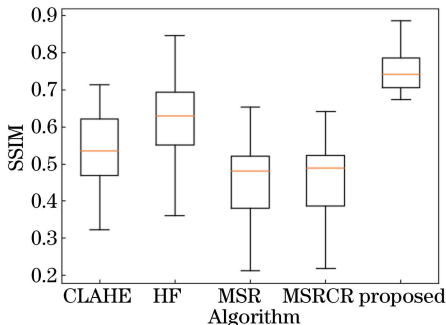


图 6 不同算法的 SSIM 对比

Fig. 6 Comparison of SSIM under different algorithms

从表 1 可以看出,本文算法处理后的 4 幅图像的 PSNR 值明显大于 MSR 和 MSRCR 算法处理后

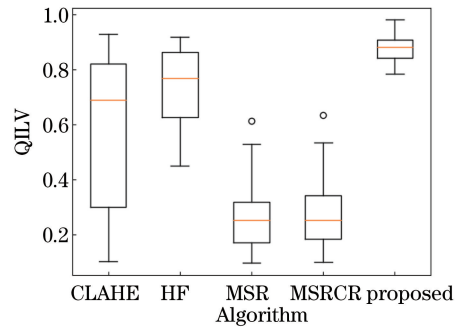


图 7 不同算法的 QILV 对比

Fig. 7 Comparison of QILV under different algorithms

的值,略优于 CLAHE 和 HF 算法处理后的值。这是因为原始图像亮度较暗,而 PSNR 值在计算过程中并没有考虑到人眼的视觉特性,故本文算法在 PSNR 值上并没有明显优于 CLAHE 和 HF 算法。但本文算法在 SSIM 和 QILV 指标上明显优于其他算法,部分图像的 QILV 值甚至接近 1,最高的达到 0.93。结合图 5~7 也可以看出,本文算法在评价指标上总体优于其他算法。这从客观上印证了主观评价的结果,即本文算法处理后的低照度图像质量相对最好,能够较好地提升亮度,同时保证图像的边缘细节信息。

4 结 论

自然环境下,夜间以及作物或林木遮挡等低照度条件会限制图像的采集,使采集到的图像质量严重下降,从而影响图像后期的应用;因此,对低照度

图像进行增强处理已经成为目前的研究热点。为解决低照度图像应用难的问题,主要基于基因表达式编程和色调保持理论,提出了使用基因表达式编程寻优的图像增强算法。实验结果表明,本文算法能够有效提高低照度图像的亮度,增强细节,在PSNR、SSIM和QILV等客观评价指标上的平均值分别为25.93、0.75和0.87,主观上颜色更加自然、视觉效果更好。本文算法可广泛适用于背光或者光照不均匀环境下的低照度图像增强。今后工作的研究重点将是解决算法运算量大、耗时多的问题。

参 考 文 献

- [1] Chen J, Zhu Q B, Huang M, *et al.* Recognition of *emposca flavescens* based on machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011502.
陈晶, 朱启兵, 黄敏, 等. 基于机器视觉的茶小绿叶蝉识别方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011502.
- [2] Min W F, Jiang Z H, Li X, *et al.* Area measurement for field crops based on UAV platform and image analysis[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2017, 43(2): 212-216.
闵文芳, 江朝晖, 李想, 等. 基于无人机平台和图像分析的田间作物检测[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(2): 212-216.
- [3] Tan Y L, Li G Y, Duan H X, *et al.* Enhancement of medical image details via wavelet homomorphic filtering transform [J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2014, 23(1): 83-94.
- [4] Lei F, Zhu L, Wang X L. Improved multi scale Retinex enhancement technology on color underwater image [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2018, 39(1): 185-188.
雷飞, 朱林, 王雪丽. 改进多尺度 Retinex 色彩灰度的水下彩色图像研究 [J]. *小型微型计算机系统*, 2018, 39(1): 185-188.
- [5] Zhang J, Zhou P C, Zhang Q. Low-light image enhancement based on iterative multi-scale guided filter Retinex[J]. *Journal of Graphics*, 2018, 39(1): 1-11.
张杰, 周浦城, 张谦. 基于迭代多尺度引导滤波 Retinex 的低照度图像增强 [J]. *图学学报*, 2018, 39(1): 1-11.
- [6] Zhang X H, Xin Y L, Huang H M, *et al.* Color image enhancement using optimal linear transform with hue preserving and saturation scaling [J]. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2015, 8(1): 1-9.
- [7] Yang S, Lee B. Hue-preserving gamut mapping with high saturation [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(19): 1221-1222.
- [8] Hu B B, Lü H J. Gray image enhancement based on improved histogram equalization and SSR algorithm [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(3): 286-292.
胡倍倍, 吕浩杰. 基于改进直方图均衡化和 SSR 算法的灰度图像增强研究 [J]. *量子电子学报*, 2017, 34(3): 286-292.
- [9] Zhuang L Y, Guan Y P. Image enhancement via subimage histogram equalization based on mean and variance [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017, 2017: 1-12.
- [10] Shin J, Park R H. Histogram-based locality-preserving contrast enhancement [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(9): 1293-1296.
- [11] Gorai A, Ghosh A. Hue-preserving color image enhancement using particle swarm optimization[C]// 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems, 2011: 563-568.
- [12] Dhal K G, Quraishi M I, Das S. Development of firefly algorithm via chaotic sequence and population diversity to enhance the image contrast [J]. *Natural Computing*, 2016, 15(2): 307-318.
- [13] Chen J, Yu W Y, Tian J, *et al.* Image contrast enhancement using an artificial bee colony algorithm [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2018, 38: 287-294.
- [14] Ferreira C. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems[J]. *Complex Systems*, 2001, 13(2): 87-129.
- [15] Jiang Z H, Li T T, Min W F, *et al.* Fuzzy c-means clustering based on weights and gene expression programming[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2017, 90: 1-7.
- [16] Li T T, Jiang Z H, Rao Y, *et al.* Image segmentation based on gene expression programming and spatial fuzzy clustering[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(5): 575-583.
李婷婷, 江朝晖, 饶元, 等. 结合基因表达式编程与空间模糊聚类的图像分割 [J]. *中国图象图形学报*, 2017, 22(5): 575-583.
- [17] Min W F, Jiang Z H, Li T T, *et al.* Multi output RBF network based on GEP optimization of modeling

- for crop physiological parameters [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(1): 165-170.
- 闵文芳, 江朝晖, 李婷婷, 等. GEP 优化的多输出 RBF 网络作物生理参数建模 [J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(1): 165-170.
- [18] Tian Q C, Cohen L D. Global and local contrast adaptive enhancement for non-uniform illumination color images [C] // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), 2017: 3023-3030.
- [19] Arici T, Dikbas S, Altunbasak Y. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(9): 1921-1935.
- [20] Fitschen J H, Nikolova M, Pierre F, *et al.* A variational model for color assignment [C] // International Conference on Scale Space and Variational Methods in Computer Vision, 2015: 437-448.
- [21] Petro A B, Sbert C, Morel J M. Multiscale Retinex [J]. Image Processing on Line, 2014, 4: 71-88.
- [22] Song R X, Li D, Yu J D. Low illumination image enhancement algorithm based on DT-CWT and tone mapping [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(7): 1305-1312.
- 宋瑞霞, 李达, 余建德. DT-CWT 和色调映射相结合的低照度图像增强算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(7): 1305-1312.