

雾化图像的约束进化时频加权滤波去雾算法

刘伟^{1,2} 崔永锋² 吴相林¹

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)¹ (周口师范学院计算机科学与技术学院 周口 466001)²

摘要 传统的基于物理纹理特征的去雾算法不能有效去除雾化图像的边缘雾点,特别在浓雾条件下处理效果不好。提出一种采用约束进化时频加权滤波的雾化图像去雾算法,首先采用分块处理方法,基于 3×3 模板求解雾化图像的暗原色。以图像暗原色为新的图像特征,设置约束进化条件,对图像雾点进行平滑重排伪魏格纳-维尔-霍夫变换(RSPWVD-Hough)时频分析,提取RSPWVD-Hough时频特征作为加权向量来指导雾化图像的盒子滤波,实现去雾处理,并通过约束进化算法对图像去雾的结果不断进行循环优化。RSPWVD-Hough时频特征能有效反映图像的边缘雾化特征点,故对雾化图像的边缘雾点去雾效果甚好。仿真测试表明,改进的图像去雾算法能在提高处理速度的同时优化图像输出结果,透过率提高明显,在浓雾条件下对图像目标识别等领域有较好的应用价值。

关键词 雾化图像,时频分析,滤波,约束进化

中图法分类号 TP399

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.09.060

Image Defogging Algorithm Based on Constrained Evolutionary Time-frequency Weighted Filtering

LIU Wei^{1,2} CUI Yong-feng² WU Xiang-lin¹

(College of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(College of Computer Science and Technology, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China)²

Abstract The traditional defogging algorithm based on physical texture feature cannot remove edge fog effectively, and the performance is bad especially in thick fog. An improved image defogging algorithm was proposed based on constrained evolutionary time frequency weighted filtering. The block processing method was taken, and 3×3 blocks were used to solve the dark color. The dark color was used as the new feature. The constraint evolution condition was set. The smoothing pseudo and RSPWVD-Hough time-frequency analysis were implemented. The RSPWVD-Hough time-frequency feature was extracted as the weighting vector to direct image box filter, and the defogging process was realized. The constrained evolutionary algorithm was used to optimize the result. Because the RSPWVD-Hough time-frequency feature can effectively reflect the edge atomization feature points of the image, the edge defogging performance is perfect. Simulation results show that the improved defogging algorithm can optimize the image defogging performance and improve the operating speed. The penetrating rate is improved greatly. It has good application value in image target recognition on thick fog condition.

Keywords Fogging image, Time-frequency analysis, Filter, Constrained evolution

1 引言

计算机图形图像处理技术是近年来随着计算机技术和各种传感器技术的大力普及而发展起来的一种先进的数据信息传递和处理技术。通过计算机数字图像处理,可以有效发掘图像中的有用特征,改变图像性能,提高图像质量,优化图像通信传输。而今,数字图像处理技术已广泛应用到图像目标识别、医学图像分析、道路交通监测以及人民生活等领域。在浓雾、灰霾等恶劣天气下,采集的图像可视度差,不能很好地反映原场景信息。特别对于一些依靠数字图像识别目标和环

境的系统如民航、飞行探测、野生动物户外监测等,如果不能对采集的原始图像进行有效的去雾处理,将导致视觉和识别效果严重下降,导致交通事故,影响飞行安全,或影响相应的户外场景监测系统的正常工作。因此,研究高效准确的去雾算法至关重要。

当前,国内外对数字图像去雾算法的研究取得了初步的成效,从方法上看,主要是采用图像增强、图像边缘检测等等方法,通过增强图像的对比度来去除图像的雾化点。通常,由于雾化图像中雾化部分深度信息未知,需要通过先验知识提取和先验假设来实现去雾处理。其中文献[1]采用多参数协

到稿日期:2013-11-25 返修日期:2014-02-06 本文受国家自然科学基金项目(U1204618),河南省重点科技攻关项目(102102210265),河南省基础与前沿研究项目(132300410400)资助。

刘伟(1975—),男,博士生,副教授,主要研究方向为计算机网络技术、智能算法、移动互联网;崔永锋(1978—),男,硕士,副教授,主要研究方向为计算机应用技术、优化算法、移动互联网, E-mail: cuiyf@zkn. edu. cn; 吴相林(1946—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能集成信息系统、Internet/Intranet 网络环境系统工程。

同滤波方法,对图像进行退化处理,还原雾化图像,但算法需要构建统计模型,由于先验未知的原因,统计模型的构建并非易事。文献[2]提出采用多幅图像在不同气象条件下拍摄对比方法进行去雾处理,通过正常气象条件下拍摄图像获得先验知识,计算场景深度变化边缘特征,实现去雾算法设计。但由于算法需要采集不同气象条件下的多幅图像,实际应用价值不大。文献[3]提出一种基于物理规律的简单去雾模型,即通过构建场景物理纹理特征,对雾化点进行虚拟重建。该方法简单易行,但准确度不高,对雾化图像的边缘雾点不能有效去除,对浓雾处理效果更差。文献[4]对夜间图像进行时频复合加权处理,在时域提取多帧图像数据的时域特性,在频域提取多帧夜间图像数据的频域特性,采用算法的加权特性,在时域和频域完成图像信息的检索,该方法的实现为本文提出雾化图像提供了参考性意义^[5-7]。

针对上述问题,本文提出一种采用约束进化时频加权滤波的雾化图像去雾算法,首先采用分块处理方法,基于 3×3 模板求解雾化图像的暗原色,以图像暗原色为新的图像特征,设置约束进化条件,通过 RSPWVD-Hough 时频分析提取雾化点的时频特征作为加权向量来指导去雾滤波,以透过率为量化指标,对去雾效果进行性能评价。最后通过仿真实验验证了算法在时效性和去雾效果上的优势。

2 模型构建与雾化图像预处理

2.1 模型构建

在进行图像去雾处理之前,首先需要进行雾化模型系统数学建模,基于 McCarney 的大气散射模型^[8],根据计算机视觉理论和图形图像处理相关预备知识,构建雾化图像生成过程中的大气散射过程和图像退化过程,模型状态方程描述为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)) \quad (1)$$

式中, $I(x)$ 为采集的原始图像的强度, $J(x)$ 为视景光线强度, A 为环境光效作用成分, $t(x)$ 为雾化透射率, $J(x)t(x)$ 为图像雾化过程衰减因子, $A(1-t(x))$ 为大气光成分作用系数,雾化图像处理和去雾的目标就是从 $I(x)$ 中恢复 $J(x)$ 、 A 和 $t(x)$ 等相关系数。

2.2 基于分块处理的图像

基于上述模型构建,采用分块处理方法对图像进行预处理,初始分块的大小选取为固定值 15×15 ,通过图像的尺寸大小 $m \times n$ 决定图像处理模板。本文在 Multigen Terrain 雾化环境模块进行 Grid DEM 数据格式转化,形成 3×3 环境模型网络结构,在多边形中点移动最大偏移量,多个多边形中点移动最大偏移量,最后实现对图形的分块处理。Mesh 网格中采样形成归一化网络直线,对雾化环境模型构建实体的每个顶点 Z 轴方向进行流线型放大处理,利用分辨率最高 LOD,形成多路径高分辨率实体环境对象模型,对对象模型进行多坐标系集合生成,模型层级递进,构成 LOD 高分辨率模型,得到 3×3 模板,从而求解雾化图像的暗原色。雾化图像分块处理过程的实现如图 1 所示。

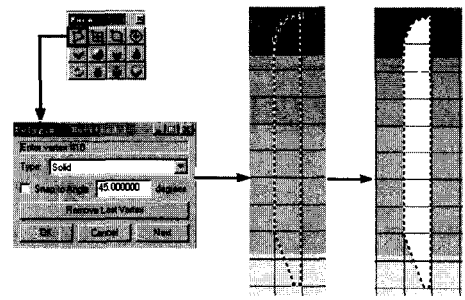


图 1 雾化图像分块处理过程实现图

2.3 图像的暗原色特征求解

暗原色先验是通过对外无雾图像的观察所得出的,通过非雾化清晰条件下观察天空局部区域,得到颜色信息通道和光照强度很低的值,对遥远雾境进行区域覆盖^[9-11]。在雾化图像 3×3 模板中,求解雾化图像的暗原色,得出新的雾化图像特征,求解过程描述如下:假设一个模糊图像信息的信号形式为:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nm} g_{nm}(t) \quad (2)$$

定义暗原色特征为:

$$J^{dark}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \quad (3)$$

其中, J^c 为图像信息 J 的某一通道,在 3×3 模板中以 x 为中心设置一块暗原区域,得到图像的强度 $J^{dark}(x)$ 逼近于 0,如果场景图像为无雾图像,则称 $J^{dark}(x)$ 为图像信号 $s(t)$ 的暗原色,把暗原色特征作为先验特征,进行后续的图像去雾处理。

3 约束进化时频加权滤波去雾算法

3.1 雾化图像暗原色约束进化算法

下一步,以图像暗原色为新的图像特征,设置约束进化条件,对图像雾点进行平滑重排和 RSPWVD-Hough 时频分析,提取 RSPWVD-Hough 时频特征作为加权向量指导雾化图像进行盒子滤波,实现去雾处理。约束进化算法是一种依靠对优化进化算法的约束完成的系统控制和进化算法,约束优化算法定义为:

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f(\vec{x}) \quad \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \\ &\text{subject to } g_j(\vec{x}) \leq 0, j=1, \dots, l \\ &\quad h_j(\vec{x}) = 0, j=l+1, \dots, p \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $x \in \Omega$; S 为约束优化进化算法的决策向量; Ω 为约束优化进化算法的可行域; $g_j YxY \leq 0$ 为第 j 个不等式约束条件, $h_j YxY = 0$ 为第 j 个等式约束条件。 l 表示不等式约束条件的个数。

当下面定义式成立时:

$$\Omega = \{x \in S \mid g_j(\vec{x}) \leq 0, j=1, \dots, l; h_j(\vec{x}) = 0, j=l+1, \dots, p\} \quad (5)$$

可以认为约束优化进化算法的进化理论是成立的。此时,约束优化进化算法可以系统地表示为:

$$\min \vec{y} = \vec{f}(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_m(\vec{x})) \quad (6)$$

其中, $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset \mathbb{R}^n$ 为优化进化的决策向量; X 为优化进化的决策空间; $\vec{y} \in Y \subset \mathbb{R}^m$ 为优化进化的目标向量; Y 为优化进化的目标空间。

得到约束进化限制条件为:

$$|h(\vec{x})| - \delta \leq 0 \quad (7)$$

其中, δ 为等式约束条件的容忍值,一般取较小的正数。在约

束优化进化算法中,将等式约束条件转换为不等式约束条件处理后,将图像暗原色特征包含在 p 个不等式约束条件中。

约束优化进化算法的优化系数定义为:

$$G_j(\vec{x}) = \begin{cases} \max(0, g_j(\vec{x})), & 1 \leq j \leq l \\ \max(0, |h_j(\vec{x})| - \delta), & l+1 \leq j \leq p \end{cases} \quad (8)$$

结合高斯正态向量特征分解特性,可将上式简化为:

$$G(\vec{x}) = \sum_{j=1}^p G_j(\vec{x}) \quad (9)$$

在对雾化图像暗原色特征进行约束进化中,约束条件动态信息特征的反映程度是非常重要的,约束优化进化算法的个体 x 在群体中的不可行性是去雾算法需要考虑的因素。值得注意的是,在约束优化进化算法中,由于各个约束条件之间存在一定情况下的特征差异,因此某些约束条件可能对约束优化进化算法中个体的约束违反程度起到一定的影响作用。

在上述对雾化图像暗原色约束进化处理的基础上,得到一幅雾化图像,其尺寸为 $m \times n$,块大小为 $block \times block$,其中 $block = \max(m, n) \times 3\%$ 。通过约束进化得到图像的大小为 600×400 ,分块处理大小为 $block = \max(600, 400) \times 3\%$,此时雾化部分块状结构为 $block = 18$ 。

通过约束进化条件的标准化来平等地对 $block$ 中每个字模块进行基于约束条件的雾天图像退化计算。在约束优化进化算法的标准化过程中,首先找出约束优化进化算法每个群体中的个体违反每个约束条件的最大值。

3.2 RSPWVD-Hough 时频分析

由于 RSPWVD-Hough 时频特征能有效反映图像的边缘雾化特征点,对雾化图像的边缘雾点去雾效果较好,因此本文提出采用提取 RSPWVD-Hough 时频特征作为加权向量指导雾化图像进行盒子滤波,实现去雾处理,并通过约束进化算法对图像去雾的结果不断进行循环优化。算法描述为:

采用 Fourier 变换将图像从时域向频域过渡,实现图像信号向频谱序列的对应,其表达式为:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

通过暗原色约束进化算法,把雾化图像的边缘特征从频域向时域的进行反变换,得到 RSPWVD 表达式为:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df \quad (11)$$

对于雾化图像 $s(t)$,通过约束进化条件得到图像像素邻近灰度为:

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s^*(u - \frac{\tau}{2}) a(\tau, v) e^{-j2\pi(vt + f\tau - uv)} du dv d\tau \quad (12)$$

把雾化图像的暗原色特进行 RSPWVD 平滑重排,结合时频分析工具中 Hough 变换,得到重排公式为:

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t', f') W_z(t-t', f-f') dt' df' \quad (13)$$

对 RSPWVD-Hough 时频分布特征平面上的任意点 (t, f) ,采用加权 WVD 得到乘积项为 $\phi(t', f') W_z(t-t', f-f')$,该乘积项看成是图像量度信息的敏感元素,它在平面上的邻近点 $(t-t', f-f')$,对邻近点以信号能量的平均值为序进行重排,得到核函数为 $\phi(t', f')$ 。通过图像雾点进行平滑重排 RSPWVD-Hough 时频分析,得到新坐标 $\hat{t}$ 和 $\hat{f}$ 定义下的 RSPWVD-Hough 时频特征为:

$$\hat{t}(t, f) =$$

$$t - \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t' \cdot \phi(t', f') W(t-t', f-f') dt' df'}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t', f') W(t-t', f-f') dt' df'} \quad (14)$$

通过上述重排运算和平均运算不仅可以使图像在去雾过程中振荡的交叉项衰减变弱,还能有效去除图像边缘雾点。

3.3 盒子滤波及图像去雾优化实现

本文采用盒子滤波的方法实现去雾处理,采用重排后 RSPWVD-Hough 时频特征加权向量指导雾化图像进行盒子滤波,并通过约束进化算法对图像去雾的结果不断进行循环优化,并进行盒子滤波设计,采用数字化处理的方法,数字化后的约束优化进化算法的优化系数定义为:

$$\begin{cases} G_j^{\max}(j \in \{1, \dots, p\}) \\ G_j^{\max} = \max_{i=1, \dots, N} (G_j(\vec{x}_i)) \\ j \in \{1, \dots, p\} \end{cases} \quad (15)$$

其中, N 为约束优化进化算法的群体规模,即群体中所包含的个体数;利用这些 $G_j^{\max}$ 可以标准化个体 $\vec{x}_i$ 对每个约束条件的约束值,最后个体 $\vec{x}_i$ 的标准化约束违反程度 $G_{nor}(\vec{x}_i)$ 定义为约束优化进化算法中个体的约束违反标准值均值。

约束进化算法对图像去雾的结果不断进行循环优化的局部线性模型是:

$$q_i = a_k^T I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (16)$$

其中, I_i 是一个 3×1 的颜色矢量, a_k^T 是一个 3×1 的系数向量, q_i 和 b_k 是标量,去雾循环优化过程描述为:

$$a_k = (\sum_k \epsilon U)^{-1} (\frac{1}{|w|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - u_k \bar{p}_k) \quad (17)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k^T u_k \quad (18)$$

$$q_i = \frac{1}{|w|} (\sum_{i \in \omega_k} a_k I_i + b_k) = a_k^T I_i + \bar{b}_i \quad (19)$$

其中, $\sum_k$ 是窗口 w 中色彩矩阵的方差, ϵ 为修正参数,本文取 $\epsilon = 0.001$, U 是 3×3 的单位矩阵, $|w|$ 是窗口 w 中像素的数目, I_i 是输入图像 I 的像素值, p_i 是过滤输入图像的像素值,是灰度图像或者是单通道图像, u_k 是窗口 w 中色彩矩阵的平均值, $\bar{p}_k$ 为过滤输入图像的像素平均值, q_i 为优化后的 t 的值。通过上述过程,采用提取 RSPWVD-Hough 时频特征指导雾化图像进行盒子滤波实现去雾处理,并实现优化逼近,得到最优去雾图像输出。

4 仿真实验与结果分析

4.1 实验环境与评价指标体系

为了测试本文提出的采用约束进化时频加权滤波的雾化图像去雾算法的性能,在操作系统为 Windows 7,系统内存为 4GB 的普通计算机上采用 MATLAB 2012 实现算法仿真。以透过率为量化指标,对去雾效果进行性能评价,透过率的计算描述为:

假设大气光 A 已知并且在局部区域 $\Omega(x)$ 内,在透射率保持一致的条件下,可求得带雾图像的暗原色为:

$$\min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A^c})) = \tilde{t}(x) \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A^c})) + (1 - \tilde{t}(x)) \quad (20)$$

无雾图像的暗原色的值趋近零,则得到透过率为:

$$Rat(x) = 1 - \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{I^c(y)}{A^c})) \quad (22)$$

其中, $\min_c(\min_{y \in \Omega(x)}(\frac{I^c(y)}{A^c}))$ 用于描述带雾图像在局部区域的暗原色值, 它可以通过计算得到, 来对去雾效果进行性能评价。

4.2 实验结果与分析

仿真实验中, 在上述实验环境下, 通过现场采集的各组图像进行去雾处理仿真, 采用本文提出的去雾算法和文献[2, 3]中的算法进行去雾处理, 以视觉效果、程序的运行速度和透过率等作为指标进行性能测试和对比。测试样本共有 3 组图像, 各组去雾处理测试结果如图 2—图 4 所示。

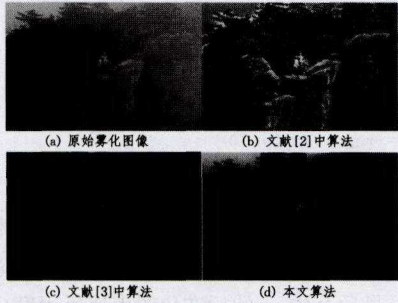


图 2 第 1 幅雾化图像处理结果

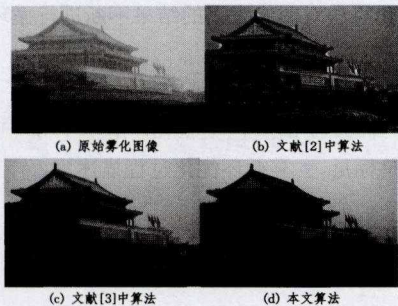


图 3 第 2 幅雾化图像处理结果

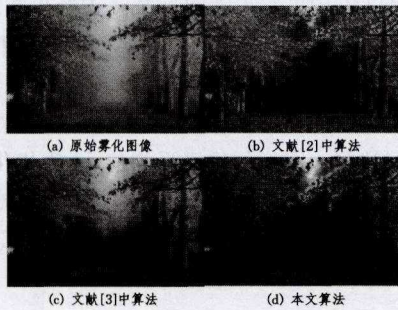


图 4 第 3 幅雾化图像处理结果

从去雾处理后的视觉效果可见, 采用本文算法处理得到的图像视觉效果较好。具体地, 由图 2 可见, 在第 1 幅雾化图像去雾处理中, 采用文献[2]中方法处理得到的图像亮度过高, 采用文献[3]处理去雾效果不明显, 特别是森林和岩石上的等边缘点上的雾没有被去除, 而本文的结果除去了图像中大部分雾, 图像逼真, 视觉效果较好; 在图 3 中, 文献[2]中方法处理后的图像的天空变成了红色, 造成了颜色的失真, 采用文献[3]得到的天空的区域的颜色也不真实; 由图 4 为对第 3 幅图像处理的结果可知, 文献[2]中算法在处理树枝和地面的雾的时候不彻底, 文献[3]中的方法得到的去雾处理图像中间树枝边缘大量雾层没有去除, 而采用本文算法只在远景部分有少量的雾, 去雾效果很好。

以程序的运行速度和透过率为定量分析指标来分析算法性能, 得到 3 种算法的系统运行耗时和透过率计算结果, 分别

如表 1 和表 2 所列。从表 1 结果可见, 采用本文算法, 系统运算耗时最少, 能很好地保证图像处理的实时性; 从表 2 结果可见采用本文算法对图像进行去雾处理得到的透过率比传统方法大幅度提高, 这从定量的角度说明了本文算法在计算耗时和去雾效果上都有较大的优势。

表 1 不同算法运算时间对比(单位: s)

图片\算法	文献[2]中算法	文献[3]中算法	本文算法
第 1 幅	9.35	63.32	6.32
第 2 幅	9.98	58.32	6.14
第 3 幅	9.21	54.21	5.36

表 2 不同算法去雾处理透过率对比

图片\算法	文献[2]中算法	文献[3]中算法	本文算法
第 1 幅	0.652	0.817	0.964
第 2 幅	0.745	0.865	0.945
第 3 幅	0.694	0.856	0.963

结束语 本文提出了一种基于约束进化时频加权滤波的雾化图像去雾算法, 首先进行了系统模型构建与雾化图像预处理, 求解图像的暗原色特征。采用分块处理思想, 设计了雾化图像暗原色约束进化算法, 对暗原色特征进行 RSPWVD-Hough 时频分析。最后设计盒子滤波器, 并通过约束进化算法对图像去雾的结果不断进行循环优化, 实现图像去雾处理。最后通过视觉效果、程序的运行速度和透过率等指标对算法性能进行评价。研究结果表明, 采用本文算法处理得到的图像视觉效果较好, 计算耗时较少, 透过率提高明显, 展示了算法优越的去雾处理性能。研究成果在复杂天气下成像目标识别等领域具有很好的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] 李敏, 李俊. 基于人类视觉系统特性的图像质量评价算法[J]. 科技通报, 2013, 29(2): 160-162

[2] 杨靖宇, 张永生, 邹晓亮, 等. 利用暗原色先验知识实现航空影像快速去雾[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(11): 1292-1295

[3] Tarel J-P. Fast visibility restoration from a singlecolor or gray level image [C]// Proceedings of IEEE Conference on International Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan, 2009, 10: 20-28

[4] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353

[5] 雷亮, 汪同庆, 杨波. 图像关联规则挖掘研究[J]. 计算机应用研究, 2009(6): 2374-2376

[6] 李艳玲, 黄春艳, 赵娟. 基于灰色关联度的图像自适应中之滤波算法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 238-240

[7] Cai Z, Wang Y. A multiobjective optimization based evolutionary algorithm for constrained optimization[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2006, 10(6): 658-675

[8] 罗海驰, 李岳阳, 孙俊. 一种基于自适应神经模糊推理系统的图像滤波方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(7): 302-306

[9] 杜辉. 基于小波变换的彩色图像中快速人脸检测算法[J]. 科技通报, 2012, 12(28): 89-90

[10] 罗海驰, 李岳阳, 孙俊. 一种基于自适应神经模糊推理系统的图像滤波方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(7): 302-306

[11] 曹健, 李海生, 蔡强. 图像目标的特征提取技术研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 409-413