



一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型

王科平, 蔡凯利, 王红旗, 杨艺

引用本文:

王科平, 蔡凯利, 王红旗, 等. 一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型[J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 271–280.

WANG Keping, CAI Kaili, WANG Hongqi, et al. A global sparse rain removal model based on rain streaks main direction adaptation[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(2): 271–280.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809042>

您可能感兴趣的其他文章

图正则化稀疏判别非负矩阵分解

Graph-regularized, sparse discriminant, non-negative matrix factorization

智能系统学报. 2019, 14(6): 1217–1224 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811021>

基于非凸加权Lp范数稀疏误差约束的图像去噪算法

Non-convex weighted-Lp-norm sparse-error constraint for image denoising

智能系统学报. 2019, 14(3): 500–507 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201804057>

稀疏化的因子分解机

Sparsified factorization machine

智能系统学报. 2017, 12(6): 816–822 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201706030>

REM记忆模型在图像分类识别中的应用

Application of REM memory model in image recognition and classification

智能系统学报. 2017, 12(3): 310–317 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201605010>

基于稀疏表示与线性回归的图像快速超分辨率重建

Rapid super-resolution image reconstruction based on sparse representation and linear regression

智能系统学报. 2017, 12(1): 8–14 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201603039>

稀疏样本自表达子空间聚类算法

Sparse sample self-representation for subspace clustering

智能系统学报. 2016, 11(5): 696–702 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201601005>

微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201809042

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20190524.0952.002.html>

一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型

王科平, 蔡凯利, 王红旗, 杨艺

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454150)

摘要: 针对现有单幅图像去雨算法较少考虑风力对雨线主方向产生影响的问题, 当雨线偏离垂直方向时, 现有方法未采取旋转或者只进行大致旋转, 去雨后的结果图出现了雨线残留明显或背景模糊化的现象。因此, 本文提出了一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型。首先, 将方差最小的图像块与图像库的雨线图依据 HOG 特征进行匹配, 将匹配度最高的雨线图主方向视作待处理雨图的雨线主方向, 从而确定全局稀疏模型的旋转角。然后, 通过 3 个包含旋转角的稀疏正则项构建全局稀疏模型进行去雨。最后, 通过颜色掩膜对全局稀疏模型去雨后的部分背景进行保护, 再与原来的 CbCr 通道重组, 得到最终的去雨图。研究表明: 在峰值信噪比和结构相似性方面, 本文算法均比 3 种典型的对比算法有所提高, 且运行时间相对短。本文算法在有效去除雨线的同时, 可较大幅度地保留图像的背景细节信息。

关键词: 单幅图像去雨; 雨线主方向; 图像分块; HOG 特征; 全局稀疏模型; 稀疏正则项; 颜色掩膜; 通道重组

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)02-0271-10

中文引用格式: 王科平, 蔡凯利, 王红旗, 等. 一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 271-280.

英文引用格式: WANG Keping, CAI Kaili, WANG Hongqi, et al. A global sparse rain removal model based on rain streaks main direction adaptation[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(2): 271-280.

A global sparse rain removal model based on rain streaks main direction adaptation

WANG Keping, CAI Kaili, WANG Hongqi, YANG Yi

(College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454150, China)

Abstract: The existing single-image rain removal algorithms do not appropriately consider the influence of wind on the main direction of the rain streaks. When the rain streak deviates from the vertical direction, the existing methods do not take rotation or only rotate roughly, resulting in the phenomenon whereby rain streaks are residual or the background is blurred. Therefore, in this paper, we propose a global sparse rain removal model based on the rain streaks main direction adaptation. First, the image block with the smallest variance and the rain streaks image of the image library are matched according to the histogram of oriented gradients (HOG) feature, and the main direction of the rain streaks image with the highest matching degree is regarded as the main direction of the image block, which can determine the rotation angle of the global sparse model; then, the global sparse model with three sparse regular terms including rotation angles is used for rain removal. After removing the rain streaks from the global sparse model, the Y-channel image is enhanced by a color mask, and thus, some parts of the background are protected. Then, together with the original CbCr-channel images, the image after treatment is further reorganized, and the final image after rain removal is obtained. The results show that compared with three typical comparison algorithms, the peak signal-to-noise ratio and the structural similarity are improved, and the running time is shorter. The proposed method can retain the background details of the image as much as possible while effectively removing the rain streaks.

Keywords: single-image rain removal; main directional of the rain streaks; the image block; HOG feature; global sparse model; sparse regularization term; color mask; reorganization by the channel image

收稿日期: 2018-09-21. 网络出版日期: 2019-05-27.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0604500); 河南省科技攻关项目 (172102210270); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (15A510025); 河南省高等学校重点科研项目 (17A480007).

通信作者: 蔡凯利. E-mail: 1574272673@qq.com.

机器视觉有广泛的应用领域, 如目标跟踪、视频监控、智能交通等。大多数计算机视觉算法都是假定输入为理想无噪声图像。然而, 对于现实中的户外视觉系统来说, 恶劣天气通常是不可

避免的,它们将显著降低户外视觉系统的性能。由于雨、雪等动态大粒子随机分布在图像中,通常会影响图像局部强度,去除难度大。基于去雨研究通常分为视频去雨和单幅图像去雨。由于视频去雨的方法可利用时间相关的多帧图像信息^[1-2],因而不适用于单幅图像去雨。而单幅图像去雨的方法可以应用于视频去雨中,解决视频去雨中不能较好处理背景变换过快的动态场景问题。因此,基于单幅图像去雨的研究显得更加有挑战性和重要性。

现如今,单幅图像去雨已引起了学术界的较大关注,可将这些单幅图像去雨方法分为3类。第1类是基于稀疏编码的去雨方法^[3-8],第2类是基于模型的去雨方法^[9-14],第3类是基于深度学习的去雨方法^[15-17]。其中,基于稀疏编码的去雨方法是根据雨线及背景边缘信息呈现出高频特性,而背景中的非边缘信息则呈现出低频特性。据此,这类去雨算法大多将待处理雨图预处理为高频子图和低频子图,对高频子图进行稀疏表示与字典学习,然后将高频子图学习出的背景边缘部分与低频子图相加,得到最终的去雨图。这类方法中,以Kang等^[4]为典型代表,通过稀疏表示和字典学习的方法来区分高频中的背景边缘与雨线,但存在误将背景字典原子认为是雨线字典原子,导致结果图出现模糊化的现象。后续去雨研究有依据背景与雨线对应稀疏编码系数的不同^[6],或通过优化几何分量等^[7]方式进行去雨,这些方法在最后同样是加上低频分量,得到最终的去雨图。以上均是基于一种稀疏模型进行单幅图像去雨,还有基于融合解析和综合稀疏模型进行去雨^[8],对融合模型迭代一定次数后,可逐步提取出背景细节,但该方法所得的背景图存在一定量的雨线残留。总之,基于稀疏编码的去雨方法效果较理想,但其中字典原子的学习过程耗时较长,实时性有待进一步提高。

基于模型的去雨方法主要依据背景与雨线结构特征的差异性,直接对图像进行去雨^[9-14]。如:基于引导滤波^[9]或基于McClellan变换^[18]设计相应的频域方向滤波器^[10]进行去雨,这些方法虽可有效地去除雨线,但计算复杂度较高。为了降低复杂度,通过分阶段^[11]或基于低阶特性模型^[12]进行去雨,均可实现有效去雨的同时,降低去雨复杂度的目标。另外,对待处理雨图添加稀疏先验项,构建稀疏约束模型进行去雨^[13-14],去雨结果图的视觉效果也较佳。但上述去雨方法当雨线偏离

垂直方向时,未将待处理雨图进行旋转或只进行大致旋转,此时去雨的视觉效果会出现一定程度下降。

最后一类是通过深度学习的方法进行去雨^[15-17]。典型的有:基于深度卷积神经网络^[15-16]或对抗网络^[17],利用干净图像块和雨线图像块的映射关系训练神经网络进行去雨。总之,这些基于深度学习的去雨算法所得结果图视觉效果较好,但其网络结构复杂,训练过程中数据量大,较难满足实时性要求。

针对现有单幅图像去雨算法很少考虑风力对雨线主方向的影响,当雨线偏离垂直方向时,去雨后的结果图出现了雨线残留明显或背景模糊化的问题,本文提出了一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型。所提算法实现了有效去除雨线的同时,较大程度地保留背景信息的目标。

1 单向全变分模型去噪

一般,雨图模型^[13]可用如下的加性噪声模型表示:

$$\mathbf{r} = \mathbf{t} + \mathbf{s} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^{MN \times 1}$ 为待处理雨图; $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^{MN \times 1}$ 为待求的背景图; $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{MN \times 1}$ 为雨线图。

加性噪声模型也应用于遥感图去除条形噪声:

$$\mathbf{I}(x, y) = \mathbf{I}_u(x, y) + \mathbf{I}_s(x, y) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{I}(x, y)$ 表示含条形噪声的观测图; $\mathbf{I}_u(x, y)$ 和 $\mathbf{I}_s(x, y)$ 分别表示待求的背景图和条形噪声图。当条形噪声沿垂直方向时,雨线与遥感图的条形噪声具有方向相似性,故雨线的方向特性也可以基于文献[19]所提的单向全变分(unidirectional total variation, UTV)模型进行表征,其单向全变分模型的最小能量函数为

$$\min_{\mathbf{I}_u} \mathbf{E}(\mathbf{I}_u) = \text{TV}_y(\mathbf{I}_u - \mathbf{I}) + \tilde{\lambda} \text{TV}_x(\mathbf{I}_u) \quad (3)$$

即:

$$\min_{\mathbf{I}_u} \mathbf{E}(\mathbf{I}_u) = \int_{\Omega} \left(\left| \frac{\partial(\mathbf{I}_u - \mathbf{I})}{\partial y} \right| + \tilde{\lambda} \left| \frac{\partial \mathbf{I}_u}{\partial x} \right| \right) dx dy \quad (4)$$

由式(4)对应的全变分模型可得以下结论:

1) 为了有助于条形噪声的去除,可将梯度信息分离为沿着垂直方向的保真项 $\int_{\Omega} \left| \frac{\partial(\mathbf{I}_u - \mathbf{I})}{\partial y} \right| dy$ 和沿着水平方向的正则化项 $\int_{\Omega} \left| \frac{\partial \mathbf{I}_u}{\partial x} \right| dx$;

2) 对保真项和正则化项应使用边缘保持范数,例如TV范数或 l_1 范数等,避免背景图出现伪

影现象。

2 基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型

2.1 自适应调节雨线主方向角度

由于在 YCbCr 颜色空间中, 雨线只出现在 Y 通道分量图, 剩余 2 通道分量图几乎看不见雨线。因此, 将输入的 RGB 空间的雨图像转换到 YCbCr 空间, 本文只需对 Y 通道分量图进行处理, 最后进行通道重组可减少计算量。

首先, 确定待处理雨图的雨线主方向。由于受风力的影响, 导致雨线在垂直方向向左或右偏转, 一般在 $90^\circ \pm 45^\circ$ 的范围内, 即雨线降落角度 $\theta \in [45^\circ, 135^\circ]$ 。将长度为 90° 的降落区间分成 9 格, 每格区间长度设置为 10° , 以每格均值 (如 $50^\circ, 60^\circ, \dots, 130^\circ$) 为雨线主降落方向, 对应图像库编号分别为 I_1, I_2, \dots, I_9 。本文之所以设置区间长度为 10° , 是确保每一幅雨图中即便雨线在不同区域存在偏差, $\pm 5^\circ$ 的角度偏差仍然满足要求。由于图像库中的雨线图的作用是为了确定待处理雨图的雨线主方向, 为了清晰显示雨线在图中的分布情况, 本文以二值图的形式进行展示所建立的纯雨线图像库, 如图 1 所示。

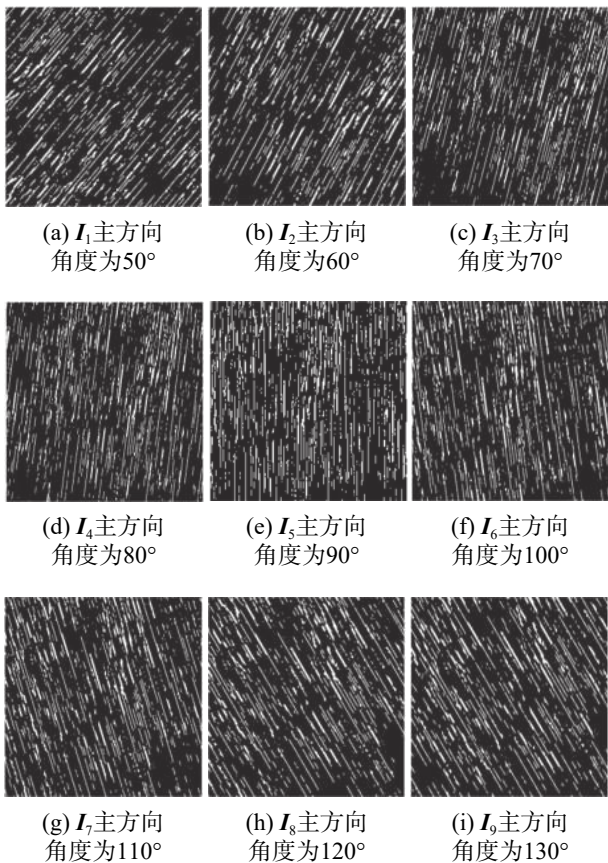


图 1 雨线图像库

Fig. 1 Rain streaks image library

每一幅雨图都存在一个雨线降落主方向, 由于在同一幅雨图中雨线降落方向近似相同, 雨线的方差较小, 而背景边缘方向各异, 其方差较大。为了较为准确确定雨线降落主方向, 将输入的雨图均分为 16 块, 取方差最小的图像块用于确定雨线降落主方向。

图 2 以“竹子”图为例进行说明, “竹子”图的第 16 小块方差最小, 该图像块中主要呈现为墙壁、地面等, 其背景相对平滑, 则该图像块受背景干扰小, 故可选取方差最小的图像块用于确定雨线降落主方向。

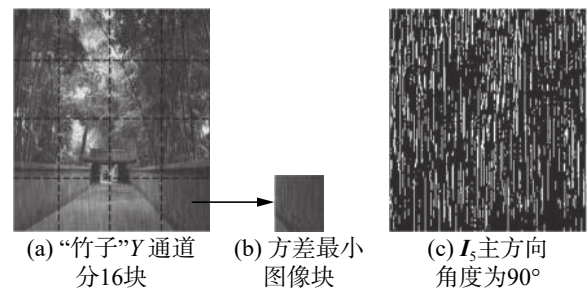


图 2 图像分块匹配确定雨线主方向

Fig. 2 Image block matching determines the main direction of the rain streaks

接着, 将以方差最小的图像块, 依据 HOG 特征进行匹配, 将匹配度最高的图像库中的雨线图的主方向降落角度 $\tilde{\theta}$ 视作待处理雨图的雨线主方向降落的角度, 旋转待处理雨图直到其雨线主方向沿垂直方向, 记旋转角为 θ 。

同样, 以“竹子”图为例说明, “竹子”图的第 16 小块方差最小, 以该图像块的 HOG 特征与雨线图像库中雨图的 HOG 特征进行匹配, 此时匹配度最高的雨图为 I_5 , 将 I_5 的雨线主方向视作待处理雨图的雨线主方向, 记雨线主方向角 $\tilde{\theta}$ 为 90° , 则旋转角 $\theta = 0^\circ$, 此时无需旋转待处理雨图。总之, 待处理雨图的旋转角 θ 为:

$$\theta = \begin{cases} 90^\circ - \tilde{\theta}, & I_1, I_2, I_3, I_4 \\ 0^\circ, & I_5 \\ -|\tilde{\theta} - 90^\circ| = 90^\circ - \tilde{\theta}, & I_6, I_7, I_8, I_9 \end{cases} \quad (5)$$

式中旋转角 θ 的正负性可用来进行旋转方向的判断, 具体为:

$$\theta = \begin{cases} \theta > 0^\circ, & I_1, I_2, I_3, I_4 \\ \theta = 0^\circ, & I_5 \\ \theta < 0^\circ, & I_6, I_7, I_8, I_9 \end{cases} \quad (6)$$

综上所述, 当雨线以不同角度偏离坐标轴时, 旋转角 θ 由以下 3 种情况确定:

1) $\theta > 0^\circ$, 需要逆时针旋转 θ , 旋转角的大小为 $90^\circ - \tilde{\theta}$, 从而使雨线近似沿着垂直方向降落;

2) $\theta = 0^\circ$, 此时待处理雨图的雨线主方向近似垂直方向, (图像库中编号为 I_5 的雨线图与方差最小图像块的 HOG 特征匹配度最高, 即: 待处理雨图的雨线主方向在 $90^\circ \pm 5^\circ$ 的区间), 无需旋转待处理雨图, 即旋转角 θ 取 0° ;

3) $\theta < 0^\circ$, 需要顺时针旋转 θ , 旋转角的大小为 $|\theta - 90^\circ|$, 从而使雨线近似沿着垂直方向降落。

然后, 基于雨线主方向建立优化模型, 为方便起见, 本文将垂直雨线主方向统一使用 \hat{x} 表示, 雨线主方向统一使用 \hat{y} 表示。

2.2 全局稀疏模型的确定

受文献 [14] 启发, 本文先确定雨线主方向后, 构建雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型, 该模型由 3 个稀疏先验项对待处理雨图进行稀疏约束, 包括一个雨线稀疏先验项, 以及背景在 \hat{x} 方向和雨线在 \hat{y} 方向的梯度稀疏先验项。

1) 雨线的稀疏正则项: l_0 范数可对雨线的稀疏性起到较好的稀疏约束作用, 但 l_0 范数的非凸性会使模型收敛到局部最优解; l_1 范数既可以表示稀疏性又具有凸性, 会使稀疏模型收敛到全局最优。故本文基于 l_1 范数对雨线添加稀疏正则项:

$$\text{Reg}^{(1)}(s) = \|s\|_1 \quad (7)$$

2) 雨线主方向 (\hat{y} 轴方向) 上的梯度稀疏性: 在该方向上, 雨线梯度沿降落方向具有稀疏平滑性。

即可对 \hat{y} 方向的雨线梯度添加稀疏正则项进行约束:

$$\text{Reg}^{(2)}(s) = \|\nabla_{\hat{y}} s\|_1 \quad (8)$$

$\nabla_{\hat{y}}$ 是 \hat{y} 方向上的差分算子。该项可看作式 (3) 的第一个正则项的变换。

3) 垂直于雨线主方向 (\hat{x} 轴) 上的梯度稀疏性: 受单向总变分 (UTV) 的启发, 背景梯度在 \hat{x} 方向受雨水影响最小, 即: 背景梯度具有稀疏性。在自然雨图像中, 雨线图 s 具有非负性。线性叠加后, 待处理含雨图 r 的强度值最大。因此, 非负性约束条件为:

$$r \geq s \geq 0 \quad (9)$$

由式 (1) 可得背景为 $t = r - s$ 。因此, 背景梯度在 \hat{x} 方向的稀疏正则项为:

$$\text{Reg}^{(3)}(s) = \|\nabla_{\hat{x}}(r - s)\|_1 \quad (10)$$

式中 $\nabla_{\hat{x}}$ 是 \hat{x} 方向上的差分算子。该项对应式 (3) 的第 2 个正则项的变换。

记 D_θ 为旋转角为 θ 的旋转运算符, 则带有 D_θ 的 3 个稀疏正则项分别为 $\|D_\theta s\|_1$ 、 $\|\nabla_{\hat{y}}(D_\theta s)\|_1$ 、 $\|\nabla_{\hat{x}}(D_\theta(r - s))\|_1$ 。

因此, 本文算法的优化模型为:

$$\begin{aligned} \min_s E(s) = \min_s \{ & \lambda_1 \text{TV}_x(D_\theta(r - s)) + \lambda_2 \|D_\theta s\|_1 + \\ & \text{TV}_y(D_\theta s) \} = \min_s \{ & \lambda_1 \|\nabla_{\hat{x}}(D_\theta(r - s))\|_1 + \\ & \lambda_2 \|D_\theta s\|_1 + \|\nabla_{\hat{y}}(D_\theta s)\|_1 \} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $r \geq s \geq 0$; λ_1 、 λ_2 是两个正则化参数且 $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ 。本文算法流程图如图 3 所示。

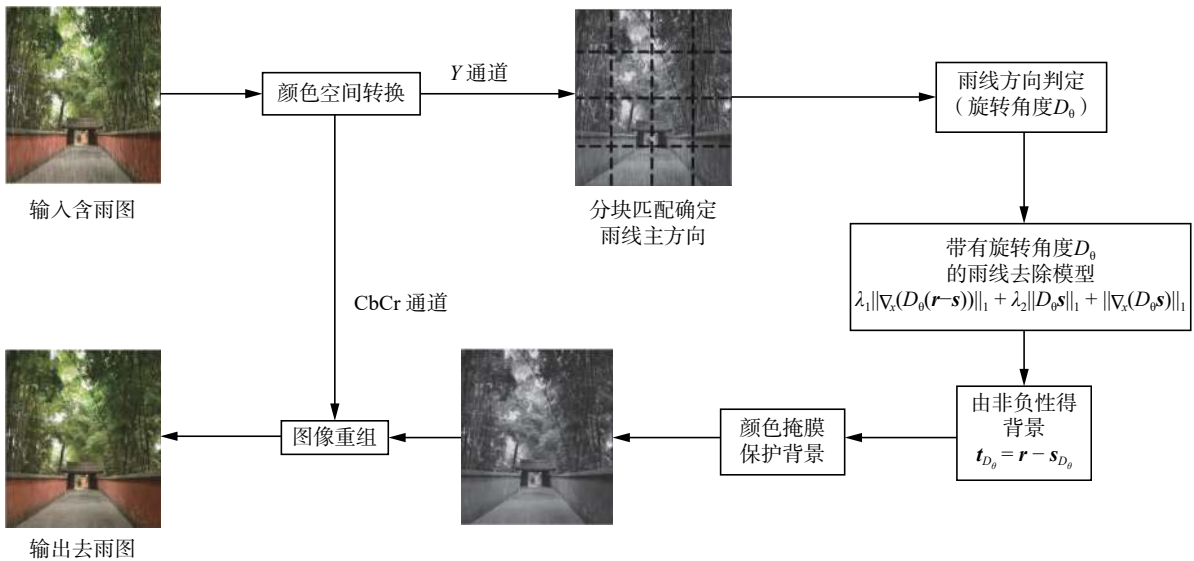


图 3 本文所提方法的流程

Fig. 3 The flow chart of the proposed method

采用约束条件解决式 (11) 对应的等价问题:

$$\min_s \{ \lambda_1 \|u\|_1 + \lambda_2 \|v\|_1 + \|w\|_1 \} \quad (12)$$

式中: $u = \nabla_{\hat{x}}(D_\theta(r - s))$; $v = D_\theta s$; $w = \nabla_{\hat{y}}(D_\theta s)$ 。

为了方便, 本文将 $D_\theta(r - s)$ 、 $D_\theta r$ 、 $D_\theta s$ 分别表示为 $r_{D_\theta} - s_{D_\theta}$ 、 r_{D_θ} 、 s_{D_θ} 。因此, 式 (12) 对应的增广拉格朗日函数为

$$\min_{\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}, \mathbf{s}} \left\{ \begin{aligned} &L(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}, \mathbf{s}, p_1, p_2, p_3) = \\ &\lambda_1 \|\mathbf{u}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{v}\|_1 + \|\mathbf{w}\|_1 + \langle p_1, \nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u} \rangle + \\ &\frac{\beta_1}{2} \|\nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u}\|_2^2 + \\ &\langle p_2, \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v} \rangle + \frac{\beta_2}{2} \|\mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v}\|_2^2 + \\ &\langle p_3, \nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w} \rangle + \frac{\beta_3}{2} \|\nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w}\|_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 是正则化参数; p_1, p_2, p_3 分别表示3个拉格朗日乘子。采用方向乘子法来解决 l_1 范数问题, 式(13)中的问题可以分解成4个简单且具有闭合解的子问题。

1) \mathbf{u} 的子问题: 固定 \mathbf{v}, \mathbf{w} , 最小化能量泛函:

$$\hat{\mathbf{u}} = \arg \min_{\mathbf{u}} \lambda_1 \|\mathbf{u}\|_1 + \langle p_1, \nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u} \rangle + \frac{\beta_1}{2} \|\nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u}\|_2^2 = \quad (14)$$

$$\arg \min_{\mathbf{u}} \lambda_1 \|\mathbf{u}\|_1 + \frac{\beta_1}{2} \left\| \nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u} + \frac{p_1}{\beta_1} \right\|_2^2$$

式(14)可通过式(15)的软阈值方法^[18]来解决:

$$\mathbf{u}^{k+1} = \text{Shrink} \left(\nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}^k) + \frac{p_1^k}{\beta_1}, \frac{\lambda_1}{\beta_1} \right) \quad (15)$$

$$\text{Shrink}(a, b) = \text{sign}(a) \max(|a| - b, 0) \quad (16)$$

式中 $\text{sign}(a)$ 为 a 的符号函数, 即:

$$\text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & a > 0 \\ 0, & a = 0 \\ -1, & a < 0 \end{cases} \quad (17)$$

2) \mathbf{v} 的子问题: 固定 \mathbf{u}, \mathbf{w} , 最小化能量泛函:

$$\hat{\mathbf{v}} = \arg \min_{\mathbf{v}} \lambda_2 \|\mathbf{v}\|_1 + \langle p_2, \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v} \rangle + \frac{\beta_2}{2} \|\mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v}\|_2^2 = \arg \min_{\mathbf{v}} \lambda_2 \|\mathbf{v}\|_1 + \frac{\beta_2}{2} \left\| \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v} + \frac{p_2}{\beta_2} \right\|_2^2 \quad (18)$$

式(18)的闭合解也通过软阈值方法来获得:

$$\mathbf{v}^{k+1} = \text{Shrink} \left(\mathbf{s}_{D_\theta}^k + \frac{p_2^k}{\beta_2}, \frac{\lambda_2}{\beta_2} \right) \quad (19)$$

3) \mathbf{w} 的子问题: 固定 \mathbf{u}, \mathbf{v} , 最小化能量泛函:

$$\hat{\mathbf{w}} = \arg \min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{w}\|_1 + \langle p_3, \nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w} \rangle + \frac{\beta_3}{2} \|\nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w}\|_2^2 = \arg \min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{w}\|_1 + \frac{\beta_3}{2} \left\| \nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w} + \frac{p_3}{\beta_3} \right\|_2^2 \quad (20)$$

子问题(20)的闭合解给出为:

$$\mathbf{w}^{k+1} = \text{Shrink} \left(\nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta}^k + \frac{p_3^k}{\beta_3}, \frac{1}{\beta_3} \right) \quad (21)$$

4) \mathbf{s}_{D_θ} 的子问题:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{D_\theta} = \arg \min_{\mathbf{s}_{D_\theta}} & \langle p_1, \nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u} \rangle + \langle p_2, \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v} \rangle + \\ & \langle p_3, \nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w} \rangle + \frac{\beta_1}{2} \|\nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u}\|_2^2 + \\ & \frac{\beta_2}{2} \|\mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v}\|_2^2 + \frac{\beta_3}{2} \|\nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w}\|_2^2 = \arg \min_{\mathbf{s}_{D_\theta}} \frac{\beta_1}{2} \\ & \left\| \nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}) - \mathbf{u} + \frac{p_1}{\beta_1} \right\|_2^2 + \frac{\beta_2}{2} \left\| \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{v} + \frac{p_2}{\beta_2} \right\|_2^2 + \\ & \frac{\beta_3}{2} \left\| \nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta} - \mathbf{w} + \frac{p_3}{\beta_3} \right\|_2^2 \end{aligned} \quad (22)$$

由于式(22)可微, \mathbf{s}_{D_θ} 的子问题的闭合解可通过式(23)求解:

$$\begin{aligned} (\beta_1 \nabla_{\hat{x}}^T \nabla_{\hat{x}} + \beta_2 \mathbf{I} + \beta_3 \nabla_{\hat{y}}^T \nabla_{\hat{y}}) \hat{\mathbf{s}}_{D_\theta}^{k+1} = \nabla_{\hat{y}}^T \left(\beta_3 \mathbf{w}^{k+1} - \frac{p_3^k}{\beta_3} \right) + \\ \beta_2 \mathbf{v}^{k+1} - p_2^k + \nabla_{\hat{x}}^T (\beta_1 \nabla_{\hat{x}} \mathbf{r}_{D_\theta} - \beta_1 \mathbf{u}^{k+1} + p_1^k) \pi \end{aligned} \quad (23)$$

式中: \mathbf{I} 表示单位矩阵。而式(23)可通过快速傅里叶变换(FFT)解决。

由非负性约束条件式(9)所得到的 $\hat{\mathbf{s}}_{D_\theta}^{k+1}$, 可由式(24)进行投影:

$$\mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1} = \min(\mathbf{r}_{D_\theta}, \max(\hat{\mathbf{s}}_{D_\theta}^{k+1}, 0)) \quad (24)$$

根据ADMM方法, 可通过式(25)更新拉格朗日乘子 p_1, p_2, p_3 :

$$\begin{aligned} p_1^{k+1} &= p_1^k + \beta_1 (\nabla_{\hat{x}}(\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1}) - \mathbf{u}^{k+1}) \\ p_2^{k+1} &= p_2^k + \beta_2 (\mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1} - \mathbf{v}^{k+1}) \\ p_3^{k+1} &= p_3^k + \beta_3 (\nabla_{\hat{y}} \mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1} - \mathbf{w}^{k+1}) \end{aligned} \quad (25)$$

本文算法将式(13)对应的复杂问题分解为4个简单的子问题, 这4个子问题均具有闭合解, 可以确保算法的准确性和快速性。其中 $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 子问题均通过软阈值法求解, \mathbf{s}_{D_θ} 子问题通过FFT来解决。

2.3 颜色掩膜保护背景

当背景和雨线的梯度相近时, 无法正确区分背景和雨线, 会出现雨线残留严重或过度平滑现象。基于此, 本文受文献[20]的启发, 考虑到雨线独特的颜色信息, 利用颜色掩膜将Y通道中部分深灰色背景像素保持原值。

通过对Y通道归一化处理, 雨线处像素值一般较大, 在原始Y通道中大多呈现较亮的灰白色, 而背景对应的像素大多表现出各种深浅不同的灰色。虽然无法确定像素值较大的灰白色像素一定为雨像素, 但是像素值较小的黑色及深灰色像素一定不会是雨像素, 这部分像素视作未受雨水影响的背景像素。设定原始Y通道像素值用 p_{y_i} 表示, w_i 表示每一个像素点 i 的颜色与白色之间的差异值, 以及 $T \in [0, 1]$ 表示整幅图像的阈值。当像素点的 w_i 越大, 即当 $w_i > T$ 时, 可认为该像素为未受雨水影响的背景像素。再定义掩膜图像的像素值为 m_i 。其表达式为:

$$m_i = \begin{cases} 1, & w_i > T \\ 0, & w_i < T \end{cases} \quad (26)$$

式中 $w_i = 1 - p_{\tilde{y}_i}$ 。

本文以“竹子”图为例来说明取不同数值的阈值 T , 遍历整幅 Y 通道分量图后, 得到对应的掩膜图以及对应增强后的 Y 通道分量图, 如图 4 所示。

由图 4 可得, 掩膜图的形成是基于原始 Y 通

道分量图, 在颜色掩膜图中用白色像素表示原始 Y 通道中像素满足 $w_i > T$ 的深灰色或黑色像素, 这些深灰色或黑色像素可视作未被雨水覆盖的背景像素, 这部分像素需在最终输出的去雨图中保留原值。而在颜色掩膜图中用黑色像素表示的像素处, 最终的输出去雨图仍采用全局稀疏模型去雨后的像素值。

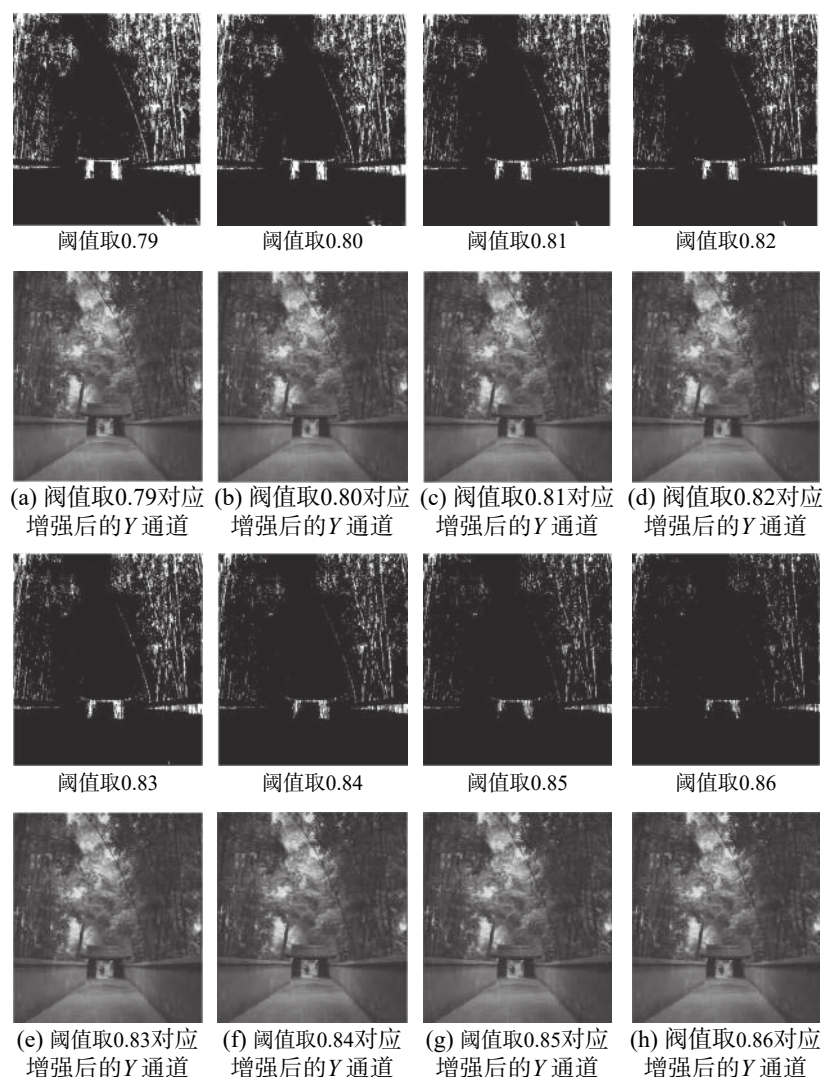


图 4 掩膜图和对对应增强后的 Y 通道图

Fig. 4 Mask image and corresponding enhanced Y -channel image

通过对 UCID 数据集的 50 幅图像进行实验, 阈值 T 取均值 0.82 时, 峰值信噪比 (PSNR)、结构相似性 (SSIM) 取得较高值。为了更加客观地评价, 本文以“竹子”图为例, 列出不同阈值 T 对应的峰值信噪比 (PSNR)、结构相似性 (SSIM) 数值, 如表 1 所示。由表 1 可得: 当阈值 T 取值逐渐增大时, PSNR、SSIM 值先增大后逐渐趋于平稳。

本文算法的步骤如下:

1) 输入 雨图 r , 通过式 (5) 确定旋转角 θ , 初始化 $\lambda_1 = 0.08$, $\lambda_2 = 0.95$; $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 200$,

$T = 0.82$; $p_1^0 = p_2^0 = p_3^0 = 0$, $s^0 = 0$, $k = 0$ 。

2) 循环 $k = k + 1$

$$\|r_{D_\theta} - s_{D_\theta}^k\| / \|r_{D_\theta} - s_{D_\theta}^{k-1}\| > \text{tol} = e^{-3}$$

and $k < M_{\text{iter}} = 200$

3) 通过式 (15)、(19)、(21) 对应求解 u^{k+1} 、 v^{k+1} 、 w^{k+1} ; 通过式 (24) 求解 $s_{D_\theta}^{k+1}$, 通过式 (25) 求解 p_1^{k+1} 、 p_2^{k+1} 、 p_3^{k+1} , 即:

$$u^{k+1} = \text{Shrink}\left(\nabla_{\tilde{x}}(r_{D_\theta} - s_{D_\theta}^k) + \frac{p_1^k}{\beta_1}, \frac{\lambda_1}{\beta_1}\right)$$

表 1 采用掩膜图后的定量分析

Table 1 Quantitative analysis with mask image

竹子	PSNR/dB	SSIM
阈值0.79	30.936 4	0.911 05
阈值0.80	30.946 8	0.915 97
阈值0.81	30.952 6	0.919 77
阈值0.82	30.959 4	0.921 89
阈值0.83	30.960 0	0.922 08
阈值0.84	30.960 2	0.922 11
阈值0.85	30.960 3	0.922 12
阈值0.86	30.960 4	0.922 12

$$\mathbf{v}^{k+1} = \text{Shrink}\left(\mathbf{s}_{D_\theta}^k + \frac{p_2^k}{\beta_2}, \frac{\lambda_2}{\beta_2}\right)$$

$$\mathbf{w}^{k+1} = \text{Shrink}\left(\nabla_{\mathbf{y}} \mathbf{s}_{D_\theta}^k + \frac{p_3^k}{\beta_3}, \frac{1}{\beta_3}\right)$$

$$\mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1} = \min(\mathbf{r}_{D_\theta}, \max(\mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1}, 0))$$

$$p_1^{k+1} = p_1^k + \beta_1 (\nabla_{\hat{x}} (\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1}) - \mathbf{u}^{k+1})$$

$$p_2^{k+1} = p_2^k + \beta_2 (\mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1} - \mathbf{v}^{k+1})$$

$$p_3^{k+1} = p_3^k + \beta_3 (\nabla_{\mathbf{y}} \mathbf{s}_{D_\theta}^{k+1} - \mathbf{w}^{k+1})$$

4) 当有下式成立时

$$\|\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}^k\| / \|\mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}^{k-1}\| > \text{tol} = e^{-3}$$

$$\text{or } k < M_{\text{iter}} = 200$$

通过全局稀疏模型所得的最小化能量泛函的解对应 Y 通道去雨图, 即:

$$\mathbf{t}_{D_\theta} = \mathbf{r}_{D_\theta} - \mathbf{s}_{D_\theta}$$

最后, 通过式 (26), 对未受雨水影响的部分背景进行保护, 通道重组后, 颜色空间转换到 RGB 空间中, 得最终的去雨结果图。

3 实验结果与分析

3.1 合成数据定性分析

为验证本文算法的有效性, 并与近期典型对比文献 [6]、[13]、[14] 所提算法进行对比实验及分析。如图 5 所示。

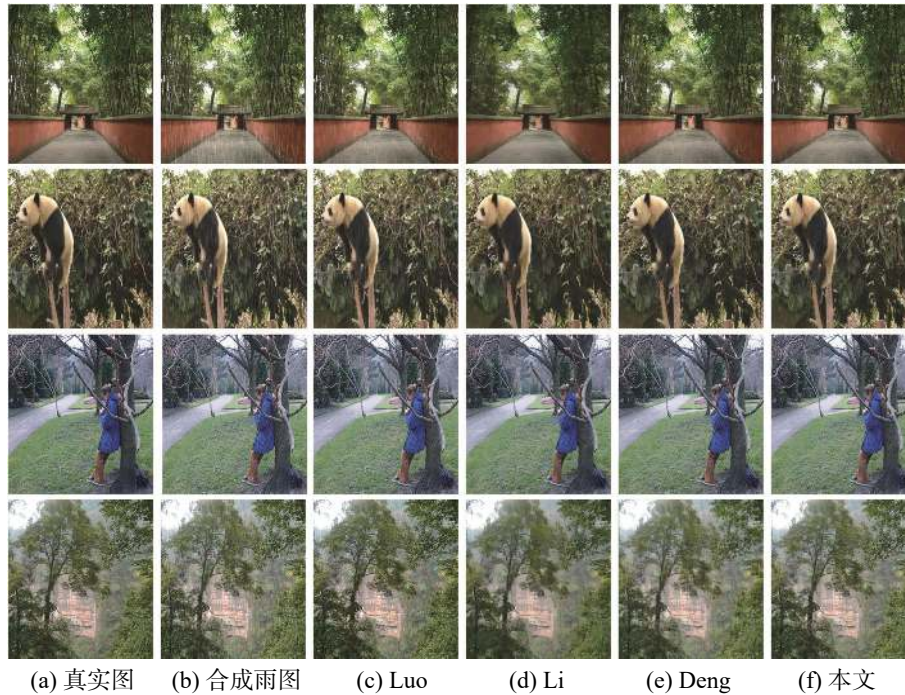


图 5 合成图的视觉效果对比

Fig. 5 Visual comparison of synthetic images

在硬件配置为 Intel(R) Core (TM) i5-3210M CPU @2.50 GHz 4 GB RAM 的 PC 机, 软件使用 Matlab R2014a 进行实验。

以“竹子”、“熊猫”、“女孩”、“树林”这 4 张合成图为例, 展示 4 种算法视觉上的差异, 可发现: Luo 等 [6] 算法背景保存最为完整, 但是雨线残留较明显, 如“竹子”图的地面等处。Li 等 [13] 算法虽

然有效地去除了雨线, 但背景细节模糊化较为明显, 如“竹子”图的竹子纹理等处。

本文算法和 Deng 等 [14] 相比, 在较大程度保护背景信息的前提下, 比文献 [14] 去雨稍彻底, 同时背景信息也能较好地保留。整体上看, 本文算法比文献 [6] 可更有效地去除雨线, 同时比文献 [13] 更好地保留图像背景的细节信息。当

雨线偏离垂直方向时,文献[14]只进行大致旋转,而本文算法由于采取了更精确的雨图旋转策略,故本文算法比文献[14]去雨更加彻底。同时,由于本文算法采用颜色掩膜对于未受雨水影响的背景进行保护,从而也较大程度地保留了背

景细节信息。

3.2 合成数据定量分析

为了更加客观地评价本文与对比算法的效果,使用峰值信噪比(PSNR)、结构相似性(SSIM)以及运行时间作为客观评价指标,如表2所示。

表 2 合成数据的定量分析
Table 2 Quantitative analysis of synthetic data

雨图	方法	PSNR/dB	SSIM	Time/s
竹子(90°)	Luo	27.740	0.829	72.310
	Li	30.522	0.895	963.628
	Deng	30.950	0.918	1.684
	本文	30.959	0.922	2.454
熊猫(左偏5°)	Luo	27.841	0.893	68.891
	Li	30.570	0.913	952.165
	Deng	30.961	0.932	1.136
	本文	31.378	0.938	2.078
女孩(左偏30°)	Luo	26.224	0.726	77.957
	Li	27.352	0.751	954.386
	Deng	28.887	0.793	0.937
	本文	28.911	0.817	2.593
树林(右偏10°)	Luo	31.001	0.908	62.414
	Li	30.871	0.883	955.602
	Deng	32.412	0.936	1.097
	本文	32.450	0.943	1.775

从表2中的实验数据可看出,本文算法的PSNR值、SSIM值比文献[6]、[13]、[14]高,表示本文得到的去雨结果图与真实图更为近似。本文算法的计算时间比文献[6]、[13]短,稍长于文献[14]。

3.3 真实数据分析

本文以“花朵”、“奥巴马”、“树木”、“自行车”作为真实图的实验数据。

图6展现出了不同去雨算法在真实图上的去雨效果。从结果图中可看出,Luo等^[6]所提算法出现雨线残留较明显的情况,如“花朵”图上方的天空、草地等处。Li等^[13]所提算法雨线去除较彻底,但是出现一定程度的背景模糊化,如“花朵”

图中草地等处。文献[14]存在少许雨线残留,如“花朵”图的天空等处。本文算法将整幅雨图的雨线去除更为彻底,同时背景信息也较大程度地被保护。

真实雨图的实验结果如图6所示。真实雨图为现实中真实存在的雨图,其不存在对应的无雨图,故无法计算PSNR值、SSIM值。本文以各算法取得最佳视觉效果运行时间作为评价指标,4种算法的运行时间如表3所示。由表3可得,本文算法的运行时间明显对比文献[6]、[13]的运行时间短,由于本文采用了自适应确定雨线主方向的策略以及对部分背景进行保护,运行时间稍长于文献[14]。整体上看,本文算法的实时性相对较高。

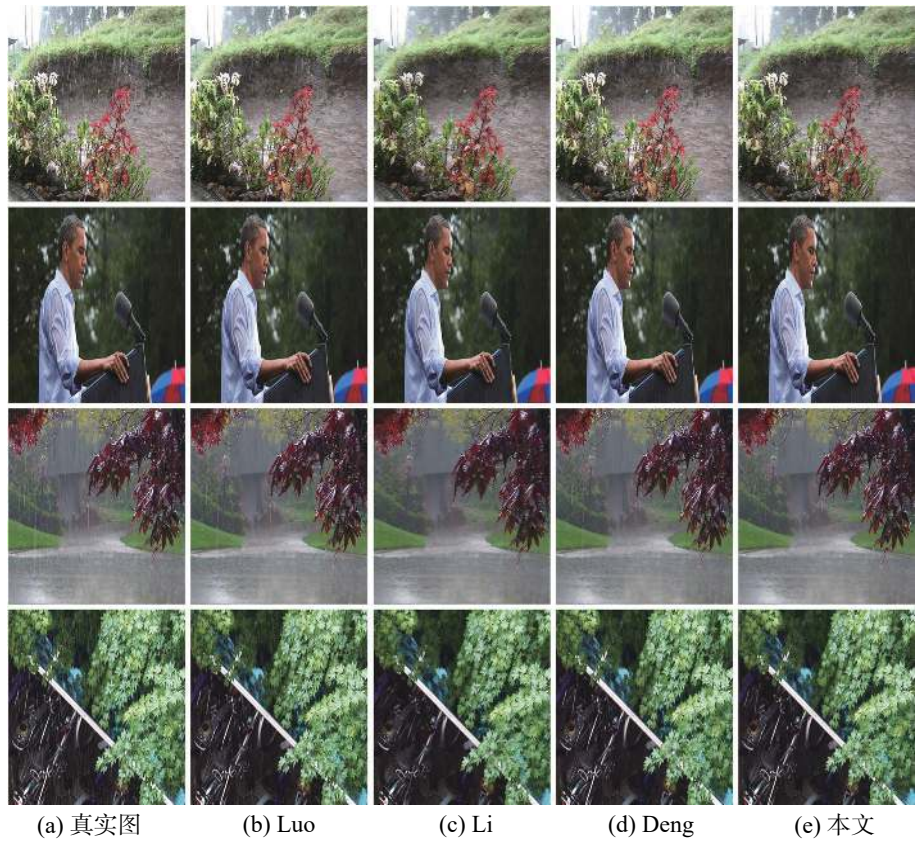


图 6 真实图的去雨效果对比

Fig. 6 Comparison of rain streaks removal on real images

表 3 不同算法的运行时间

Table 3 Running time of different algorithms s

	Luo	Li	Deng	本文
花朵	85.471	1 043.838	1.624	2.554
奥巴马	78.934	956.581	0.892	1.632
树木	79.355	976.016	1.067	1.935
自行车	78.521	961.667	0.883	1.951

4 结束语

现有的单幅图像去雨算法很少考虑风力对雨线主方向的作用, 当雨线偏离垂直方向时, 现有方法未采取旋转或只是进行大致旋转, 去雨后的雨图出现雨线残留明显或背景模糊的现象。针对该问题, 本文提出一种基于雨线主方向自适应的全局稀疏去雨模型。实验结果表明, 本文算法在有效去雨的同时能较大程度地保留背景信息, PSNR 和 SSIM 值相对高, 运行时间相对短。

参考文献:

[1] REN Weihong, TIAN Jiandong, HAN Zhi, et al. Video desnowing and deraining based on matrix decomposition[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on

Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, HI, USA, 2017: 2838–2847.
[2] JIANG Taixiang, HUANG Tingzhu, ZHAO Xile, et al. A novel tensor-based video rain streaks removal approach via utilizing discriminatively intrinsic priors[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, HI, USA, 2017: 2818–2827.
[3] FU Y H, KANG Liwei, LIN C W, et al. Single-frame-based rain removal via image decomposition[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague, Czech Republic, 2011: 1453–1456.
[4] KANG Liwei, LIN C W, FU Y H. Automatic single-image-based rain streaks removal via image decomposition[J]. *IEEE transactions on image processing*, 2012, 21(4): 1742–1755.
[5] CHEN Duanyu, CHEN C C, KANG Liwei. Visual depth guided image rain streaks removal via sparse coding[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems. Taipei, China, 2012: 151–156.
[6] LUO Yu, XU Yong, JI Hui. Removing rain from a single image via discriminative sparse coding[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision. Santiago, Chile, 2015: 3397–3405.
[7] 庞彦伟, 周俊, 邓君坪, 等. 基于图像分解与字典分类的单幅图像去雨算法 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程

- 技术版), 2017, 50(4): 391–398.
- PANG Yanwei, ZHOU Jun, DENG Junping, et al. Single-image rain removal algorithm based on image decomposition and dictionary classification[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(4): 391–398.
- [8] GU Shuhang, MENG Deyu, ZUO Wangmeng, et al. Joint convolutional analysis and synthesis sparse representation for single image layer separation[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Venice, Italy, 2017: 1717–1725.
- [9] XU Jing, ZHAO Wei, LIU Peng, et al. An improved guidance image based method to remove rain and snow in a single image[J]. Computer and information science, 2012, 5(3): 49–55.
- [10] LIU Changbo, PANG Yanwei, WANG Jian, et al. Frequency domain directional filtering based rain streaks removal from a single color image[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Computing. Taiyuan, China, 2014: 415–424.
- [11] KIM J H, LEE C, SIM J Y, et al. Single-image deraining using an adaptive nonlocal means filter[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne, VIC, Australia, 2014: 914–917.
- [12] CHEN Yilie, HSU C T. A generalized low-rank appearance model for spatio-temporally correlated rain streaks[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Computer Vision. Sydney, NSW, Australia, 2013: 1968–1975.
- [13] LI Yu, TAN R T, GUO Xiaojie, et al. Rain streak removal using layer priors[C]//Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA, 2016: 2736–2744.
- [14] DENG Liangjian, HUANG Tingzhu, ZHAO Xile, et al. A directional global sparse model for single image rain removal[J]. Applied mathematical modelling, 2018, 59: 662–679.
- [15] FU Xueyang, HUANG Jiabin, DING Xinghao, et al. Clearing the skies: a deep network architecture for single-image rain removal[J]. IEEE transactions on image processing, 2017, 26(6): 2944–2956.
- [16] YANG Wenhan, TAN R T, FENG Jiashi, et al. Deep joint rain detection and removal from a single image[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu, HI, USA, 2017: 1685–1694.
- [17] ZHANG He, SINDAGI V, PATEL V M. Image de-raining using a conditional generative adversarial network[J/OL]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology: (2019–06–03). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8727938>. DOI: 10.1109/TCSVT.2019.2920407.
- [18] SHYU J J, PEI S C, HUANG Yunda. Design of variable two-dimensional FIR digital filters by McClellan transformation[J]. IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers, 2009, 56(3): 574–582.
- [19] BOUALI M, LADJAL S. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2011, 49(8): 2924–2935.
- [20] 刘长波. 基于稀疏表示和频域方向滤波的图像雨雪去除算法 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 26–27.
- LIU Changbo. Sparse coding and frequency domain directional filtering based Image rain and snow removal[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 26–27.

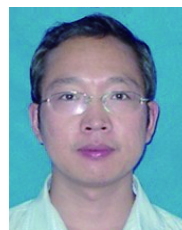
作者简介:



王科平, 副教授, 博士, 主要研究方向为图像处理、目标跟踪、深度学习。主持或参与省部级以上科研项目 10 余项, 出版专著 1 部。发表学术论文 30 余篇。



蔡凯利, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。



王红旗, 副教授, 博士, 主要研究方向为控制理论与应用。主持或参与省部级以上科研项目 10 余项。发表学术论文 40 余篇。