

透射率和大气光自适应估计的暗通道去雾

邱东芳^{1*}, 黄光辉¹, 刘 星², 杨 兵³

(1. 重庆大学 数学与统计学院 重庆 401331; 2. 重庆大学 土木工程学院 重庆 400044; 3. 北京机电工程研究所 北京 100074)

(* 通信作者电子邮箱 qiudongfang8121@163.com)

摘 要: 针对暗通道先验理论去雾算法景深突变区域容易出现光晕、不满足暗通道先验理论区域出现颜色失真、大气光估计不准确容易导致偏色现象 提出了自适应透射率和大气光估计的去雾算法。通过 Canny 算子结合形态学膨胀运算确定易出现光晕效应的区域 在该区域上采用像素等级差诱导高斯核函数得到的自适应高斯滤波器来消除光晕效应。其次 提出一种天空区域透射率估计方法处理因不满足暗原色原理出现的天空区域颜色失真问题。最后, 提出先估计大气光方向 再最大化大气光方向与前 1% 最亮像素点的相似度的大气光估计方法。实验表明, 该算法获得的透射率图精细, 复原图像自然, 能够有效去除光晕效应, 修正天空区域的颜色失真。

关键词: 暗通道图; 透射率; 大气光估计; 大气散射模型; 自适应高斯滤波器

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Dark channel haze removal based on adaptive transmission and airlight estimation

QIU Dongfang^{1*}, HUANG Guanghui¹, LIU Xing², YANG Bin³

(1. College of Mathematics and Statistics, Chongqing University, Chongqing 401331, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Beijing Electromechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: In haze removal based on dark channel prior theory, the main failure includes: 1) halo effect in the area with depth mutation; 2) color distortion in the field where the dark channel prior theory is not satisfied; 3) color cast due to inaccurate estimation of airlight. In this paper, an adaptive transmission and airlight estimating method was proposed. Canny operator and dilation operation were applied in halo-effect area detection; on the other hand, an adaptive Gaussian filter based on pixel-level Gaussian kernel function was used to eliminate the halo effect. A method of estimating sky transmission was applied to deal with the color distortion because of dissatisfaction of dark channel prior. Finally, a new airlight estimating method was proposed: first, the direction of airlight was estimated; second, the top 1% brightest pixels were picked; third, the pixel with the highest similarity to the estimated direction of airlight was regarded as airlight. The experiment results show that the proposed approach can achieve refined transmission image, unaffected recovery pictures. Besides, the proposed method can effectively eliminate the halo effect, revise the color cast of sky region.

Key words: dark channel image; transmission; airlight estimation; atmosphere scattering model; adaptive Gaussian filter

0 引言

雾霾天气下, 空气中悬浮的气溶胶粒子对光的吸收和散射, 造成雾霾天气下成像设备所拍摄的图像对比度降低, 颜色衰减, 这使得获取图像质量严重下降, 不利于户外视觉信息采集, 且对图像的后续研究造成极大影响。因此, 对雾霾天气下拍摄的图像进行复原的研究有着重要的意义。

近年来, 针对单幅图像去雾的算法发展迅速, 主要可分为简单图像的增强和物理模型去雾两种方法。图像增强的方法主要有直方图均衡化^[1]、Retinex 算法^[2-3]以及小波变换^[4], 这些对去雾都有一定的效果, 但是浓雾天气下图像的去雾效果不显著。目前有学者通过在物理模型的基础上使用小波变换进行去雾^[5-6]。常用物理模型的去雾算法主要有 Tan 算法^[7]、Fattal 算法^[8]以及 He 算法^[9]。它们大都是基于某种先验理论而提出的去雾算法, 文献[7]发现无雾图像相对于有雾图像具有更强的对比度, 从而通过最大化图像的对比度来达到去雾目的。文献[8]通过假设大气传播率和物体表面阴

影局部不相关来估计场景的反射率, 并推导出介质传播率, 该方法对于雾较少的情况下能够取得较好的去雾效果; 然而, 当处理浓雾图像时, 由于假设条件的不满足, 无法得到可靠的介质传播率。文献[9]提出了一种基于暗通道先验理论的去雾算法, 其效果明显, 被视为目前最有效且简单的去雾方法; 该方法即使对浓雾的处理也有一定的效果。但是, 为了获得更加精细的透射率图, 使用软抠图法(soft matting)优化透射率, 增加了时间复杂度, 不适合在线处理。文献[10-12]使用具有保边效果的双边滤波, 文献[13]使用中值滤波, 文献[14]采用 Gamma 变换和中值滤波, 文献[15]将中值滤波与均值滤波相结合, 文献[16-18]使用导向滤波来替代软抠图法, 优化透射率, 降低复杂度, 但是获得的透射率图却没有经软抠图法优化后那么精细。本文在暗通道先验理论去雾的基本框架下, 检测可能发生光晕效应的区域, 在此区域上进行自适应的像素级高斯滤波代替软抠图法, 实验结果表明, 本文算法复杂度低且能获得比软抠图法更加精细的透射率图。

现在普遍使用的雾天图像复原模型为大气散射模型:

收稿日期: 2016-10-18; 修回日期: 2017-11-16。 基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(CQDXWL-2013-Z009)。

作者简介: 邱东芳(1990—), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉、模式识别; 黄光辉(1977—), 男, 四川成都人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 图像处理; 刘星(1967—), 男, 重庆人, 教授, 博士, 主要研究方向: 工程测量; 杨兵(1967—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向: 数字图像处理。

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

其中: $I(x)$ 指有雾图像, $J(x)$ 指无雾图像, 即待复原的图像, $t(x)$ 指透射率, A 指大气光, 且有 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, 这里 $d(x)$ 指景深, β 指消光系数。图 1 为模型的图像表示。

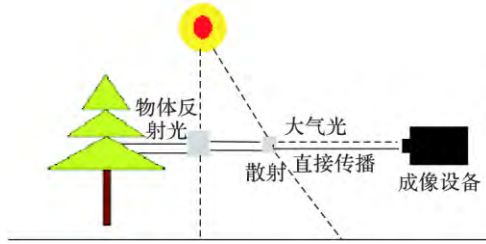


图 1 大气散射模型

1 暗原色先验理论

1.1 暗原色先验理论的发现

暗原色先验理论为一种统计先验理论。文献[9]通过对大量晴天图像的统计,发现对于晴天时的三通道图像,多数像素点的局部邻域里至少有一个通道存在很低的像素值。提取图像中像素点各个通道中的最小值并作最小值滤波为暗通道图 J_{dark} , 即:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} (J^c(y)) \right) \rightarrow 0 \quad (2)$$

1.2 暗通道先验理论的去雾原理

首先,假定大气光 A 已知,然后由式(1)、(2),可得粗略的透射率图

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (3)$$

有时为了使复原图像更加真实,保留少部分雾,因此引入修正系数 w , 即

$$\tilde{t}(x) = 1 - w \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} [I^c(y)/A^c] \right) \quad (4)$$

进一步可以求出复原图像:

$$J(x) = A + (I(x) - A) / \tilde{t}(x) \quad (5)$$

2 暗通道先验去雾存在的问题和原因分析

2.1 光晕现象原因分析

发生光晕效应的主要原因是图像边缘处不满足局部透射率相等的条件,对最小暗通道图

$$W(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(x) \quad (6)$$

采用最小值滤波,导致局部透射率被低估。所以,不少人尝试在不破坏暗原色先验理论去雾的整体框架下,对边界 w 作一定的处理,以消除光晕效应。文献[19]通过边缘检测找到雾天图像的边界,在边界处对 W 进行最大值滤波代替最小值滤波。

2.2 天空区域失真原因分析

基于暗原色统计先验理论的去雾算法简单有效,但是针对天空区域,复原图像容易失真。这是因为在天空区域,不满足暗通道先验理论。天空区域的像素值和大气光 A 非常接近,即:

$$\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y)) \rightarrow A \quad (7)$$

由式(3)可得 $\tilde{t}(x) \rightarrow 0$ 。

但是,由于大气光 A 通常是像素值比较大的点,且天空区域有 $I_{\text{dark}}(x) \approx J_{\text{dark}}(x)$ 由式(1)有:

$$t(x) = \frac{1 - \frac{I_{\text{dark}}(x)}{A}}{1 - \frac{J_{\text{dark}}(x)}{A}} \rightarrow 1 \quad (8)$$

因此,根据式(4),实际天空区域透射率被低估,从而需要对天空区域需要采用调整透射率的优化算法。由于晴天图像 $J(x)$ 的信息未知,式(8)无法计算,所以需通过雾天图像估计 J_{dark} 。文献[21]采用阈值法识别天空区域,然后在天空区域通过

$$t(x) = \begin{cases} \frac{1 - W(x)/A}{1 - I_{\text{dark}}(x)/A}, & |A - I_{\text{dark}}(x)| \geq |A - W(x)| \\ \frac{1 - I_{\text{dark}}(x)/A}{1 - W(x)/A}, & |A - I_{\text{dark}}(x)| \leq |A - W(x)| \\ 1, & I_{\text{dark}}(x) = A \text{ 或 } W(x) = A \end{cases} \quad (9)$$

来调整天空区域透射率。文献[22]也是先采用阈值法识别明亮区域,然后将明亮区域透射率修正为:

$$t(x) = \min \left(kA^c \left(1 - \min_{c \in \{R, G, B\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} (I^c(y)/A^c) \right) \right), 1 \right) \quad (10)$$

k 是比例因子。经过仿真实验,这些都对天空区域的透射率修正有一定的效果,使得复原图像的天空区域更符合真实场景。

2.3 大气光 A 的估计不准确

大气光 A 的估计会对复原图像的色彩产生重要影响。文献[23]指出如果大气光 A 的估计值比真实值偏大,会使得复原图像远景较暗,近景较亮。反过来,如果 A 的估计值比真实值偏小,则会使得复原图像的远景较亮,近景较暗。文献[9]通过挑选 I_{dark} 中亮度最大的前 1% 像素值,对应原图中可能雾最浓的区域,然后从原图中提取亮度最大值像素点作为大气光,以此来提高对大气光识别的鲁棒性。该方法主要强调了大气光亮度而没有考虑大气光的方向。目前在采用暗原色统计先验理论来复原无雾图像的方法中,大都采用文献[9]中的方法。文献[23]中假定存在一些区域块,满足物体表面对光的反射率相等,先确定 A 的方向 \hat{A} ,再确定 A 的大小 $\|A\|$,然后由 $A = \hat{A} * \|A\|$ 来确定 A 。在计算中,由于要遍历每一个像素周围的区域块,进而选择满足假设条件区域块,这样不仅时间复杂度高,而且参数不容易获得,也会导致满足条件的区域块过多或者太过于集中于某一区域。目前在雾天图像的复原过程中,常通过全局最大亮度值来估计 A ,这样得到的大气光可能为图像中较亮物体的像素值而不是大气光。文献[24]和文献[25]通过半逆法(半反法)来识别图像中的明亮区域,进而识别大气光。学者们倾向于先识别天空区域,然后再从天空区域中挑选亮度最大的值估计大气光。文献[26]通过对雾天图像先进行高斯滤波并计算其梯度图,然后对梯度图进行二值化处理,再与二值化的原图作并运算,以此来识别天空区域。文献[27]通过 K -均值聚类算法识别天空区域,然后通过加权计算天空区域亮度均值,最后通过计算天空区域均值和聚类中心的加权作为最后的大气光值 A 。对于遥感图像,是没有天空区域的,所以通过识别天空区域来估计大气光的方法不能广泛使用。

3 本文算法及实验

3.1 本文算法

综上所述,基于暗原色先验理论的去雾主要有如下几个方面的问题:1)在边界出现光晕效应;2)复原图中天空区域出现颜色失真;3)大气光 A 的估计不准确。针对这些问题,本文进行如下改进。

1)对于边界出现光晕效应问题,在不破坏暗原色先验理

论去雾框架的条件下,对出现光晕效应的区域使用自适应像素级高斯滤波。首先,Canny检测算子对边界具有很好的识别效果,识别出的边界轮廓线条细致,因此可以用来检测原雾天图像的边界 I_{Canny} ,然后对 I_{Canny} 作形态学滤波的膨胀运算,形态学滤波的窗口大小与对 W 作最小值滤波时所选窗口的大小相同,检测出的边界则为可能发生光晕效应的区域 $I_{\text{Halo}} = 255$,在该区域上对 W 采用像素等级差诱导的高斯核函数作自适应的像素级滤波处理,本文实验中选择 7×7 的滤波窗口。即:

$$I_{\min}(x) = \begin{cases} \min_{y \in \Omega(x)} (W(y)), & I_{\text{Halo}}(x) = 0 \\ \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M G(W(y) - W(x)) \times W(y), & I_{\text{Halo}}(x) = 255 \end{cases} \quad (11)$$

M 为邻域 $\Omega(x)$ 中像素点的个数, $G(x)$ 为高斯核函数, $y \in \Omega(x)$ 为像素 x 的邻域中的像素点, $I_{\min}(x)$ 为代替原来最小值滤波的滤波图。

2) 针对复原图中天空区域容易失真的问题,对天空区域的透射率进行优化,首先是对天空区域的识别。文献[28]中指出,雾霾天气下天空区域的颜色多呈灰白,而白色物体,水面反光近乎白色。且有 $\max |I^c - F^c| < 10$; $c, c' \in \{R, G, B\}$ 。

又由于天空区域亮度较高,满足如下两个条件的则判别为天空区域。

$$\max |I^c - F^c| < 10$$

$$\lim = \sum_c |A^c - I^c| < 30, c \in \{R, G, B\}$$

在天空区域,由式(8)得 $t(x) \rightarrow 1$,式(1)近似为:

$$I(x) \approx J(x) t(x) \quad (12)$$

又因为天空区域中有 $J(x) \approx A$,为使得复原图像更自然些,保留少部分雾,因此在天空区域中 $t(x) = w \cdot I_{\text{dark}}(x) / A^c$,其他区域透射率为 $t(x) = 1 - w \cdot I_{\text{dark}}(x) / A^c$ 。从图3可以看出本文获得的透射率图比文献[9]中的软抠图算法更加细致,且时间复杂度低,天空区域的透射率更加接近真实场景。

3) 对于大气光识别问题,受文献[9]和文献[23]启发,本文优化文献[23]的方法识别大气光方向 \hat{A} ,然后通过挑选有雾图像中前1%亮度最大的像素,计算其与 \hat{A} 的相似度,选择相似度最高的像素作为大气光,实验表明,该方法识别的大气光使得复原出的图像清晰自然。文献[23]选取每个像素点周围邻域块,本文则通过对有雾图像平均分成 10×10 的邻域并通过计算得分的方法代替文献[23]中交替进行筛选邻域块的方法。本文中大气光的识别步骤如下:

1) 计算各个邻域块的特征值 $\lambda_1^i > \lambda_2^i > \lambda_3^i$ 与相应的特征向量 $[\eta_1, \eta_2, \eta_3]$;

2) 求 $\lambda_{1/2}^i = \lambda_1^i / \lambda_2^i$;

3) 计算原点到各个邻域块直线(过邻域块的质心,方向为最大特征值所对应特征向量的方向)的距离 d_i ;

4) 计算得分 $S_i = \alpha_1 \lambda_{10}^i + \alpha_2 \lambda_{1/20}^i + \alpha_3 d_{20}^i$; $\lambda_{10}^i, \lambda_{1/20}^i, d_{20}^i$ 为归一化处理的 $\lambda_1^i, \lambda_{1/2}^i$; $d_i, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为权重;

5) 选择得分最高的 l 个图像块作为所选图像块(本文实验中 $l = 10$);

6) 计算所选的 l 图像块直线之间的交点(根据文献[23],交点到原点的连线即为候选大气光的方向);

7) 计算候选方向到所选邻域块之间的距离,平均距离最

小的候选方向即为大气光方向 \hat{A} ;

8) 选择有雾图像 I 中前1%亮度最大的像素,组成像素集 I_0 ,然后计算 I_0 中每一个像素与 \hat{A} 的相似度 $\text{Sim}(I_0, \hat{A}) = \langle I_0, \hat{A} \rangle$,相似度最大的像素值即输出为大气光 A 。



(a) 文献[9]透射率图 (b) 本文透射率图

图2 透射率图

由于本文算法同时考虑了大气光的方向和亮度信息的特点,减少了白色物体对大气光识别造成的影响,同时也可以减少文献[23]中迭代算法计算大气光值的复杂度。

表1 大气光估计

图片名称	文献[9]方法	本文方法
天安门	[233, 221, 199]	[230, 219, 197]
故宫	[242, 255, 253]	[237, 254, 253]
森林	[255, 254, 255]	[255, 248, 245]
火车	[255, 255, 255]	[254, 254, 242]
Canon	[198, 187, 178]	[183, 177, 170]

3.2 实验

本文实验均在Qt环境下运行,采用主观和客观评价方式对算法的去雾效果给予评价,本文采用文献[29]所提出的复原图像客观评价机制对图像的复原效果进行评价。文献[29]提出了一种新的无参考质量评测方法,认为暗通道先验(Dark Channel Prior, DCP)比例越大,去雾效果越好。

$$T = J_D / M$$

J_D 指复原图像中暗通道图 J_{dark} 中像素值低于 25 的像素个数, M 为图像中总的像素的个数。 T 越大, 表明去雾越彻底, 越符合晴天真实图。考虑到 J_{dark} 受最小值滤波窗口的影响, 会对评价造成一定的影响, 所以本文用 J_W 代替 J_{dark} 。其中, $J_W(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (J(x))$ 。

表 2 复原图像 T 值

图片名称	文献[10]方法	文献[15]方法	本文方法
天安门	0.319	0.290	0.389
故宫	0.095	0.116	0.138
森林	0.451	0.274	0.674
火车	0.105	0.121	0.230
Canon	0.216	0.175	0.219

从图 3 和表 2 中可以清楚看到: 文献[10]中使用双边滤波, 可以消除光晕效应, 但是复原图像暗沉; 文献[10]中对复原图像进行色调调整, 使得复原图像亮度增加; 文献[15]不能完全消除光晕效应, 却又引入了暗斑效应; 本文算法去雾效果明显, 有效去除了光晕效应, 修正了天空区域的颜色失真, 复原图像更加符合真实场景。

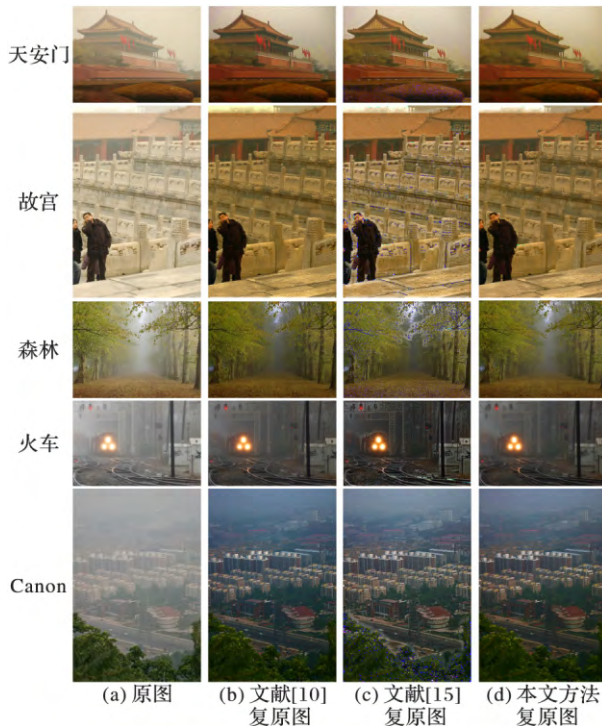


图 3 雾天图像复原图

4 结语

本文中提出的基于暗原色先验的去雾算法, 获得了比较抠图算法更加精细的透射率图, 有效去除了光晕效应, 解决了天空区域的颜色失真问题, 去雾效果明显, 更加符合真实场景; 而且通过对文献[23]方法的改进, 大大降低了求大气光的时间复杂度, 准确地估计出了大气光。但是, 由于复原图像进行了滤波处理, 会导致图像的高频信息丢失, 边界模糊, 今后要注意复原图像高频信息的保护, 使得复原图像更加清晰。

参考文献:

- [1] 李利荣, 汪蒙. 一种高效的图像增强去雾算法[J]. 湖北工业大学学报, 2013, 28(5): 72–75.
- [2] 李菊霞, 余雪丽. 雾天条件下的多尺度 Retinex 图像增强算法

[J]. 计算机科学, 2013, 40(3): 299–301.

- [3] 张鑫, 王卫星, 张元方, 等. 基于分数阶微分及改进 Retinex 的模糊航空图像的增强[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(9): 2844–2848.
- [4] 林英. 基于小波变换的同态滤波法去雾图像处理[J]. 龙岩学院学报, 2008, 26(6): 32–36.
- [5] ZHANG H, LIU X, HUANG Z, et al. Single image dehazing based on fast wavelete transform with weighted image fusion[C]// Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2014: 4542–4546.
- [6] 聂宁, 吴四九, 程卫东. 基于小波变换的图像去雾研究[C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Computer, Communications and Information. Beijing: Atlantis Press, 2014: 399–403.
- [7] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 1–8.
- [8] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): Article No. 72.
- [9] 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.
- [10] 甘佳佳, 肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 583–590.
- [11] TRIPATHI A K, MUKHOPADHYAY S. Single image fog removal using bilateral filter[C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control. Piscataway: IEEE, 2012: 1–6.
- [12] KIM S, PARK S, CHOI K. A system architecture for real time traffic monitor ing in foggy video[C]// Proceedings of the 2015 21st Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2015: 1–4.
- [13] GIBSON K B, VÖ D, NGUYEN T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding[C]// IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(2): 662–673.
- [14] KUMARI A, THOMAS P T, SAHOO S K. Single image fog removal using gamma transformation and media filtering[C]// Proceedings of the 2014 Annual IEEE India Conference. Piscataway: IEEE, 2014: 1–5.
- [15] 刘红平, 陈明义. 基于二次滤波的单幅图像快速去雾算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(8): 156–159.
- [16] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[C]// Proceedings of the 2010 European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2010: 1–14.
- [17] 石文轩, 詹诗蕊, 李婕. 一种边缘化的暗通道去雾算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(12): 3854–3856.
- [18] 钱晓燕. 单一图像多滤波联合快速去雾算法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(6): 236–240.
- [19] 陈露, 和红杰, 陈帆. 基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 11003-1–111003-6.
- [20] 张小刚, 唐美玲, 陈华, 等. 一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(8): 1733–1739.
- [21] 白海平, 杨燕. 基于暗通道先验的比值重估透射率去雾算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(13): 212–217.
- [22] 催宝侠, 贾冬雪, 段勇. 明亮区域的暗原色先验算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(1): 75–79.
- [23] SULAMI M, GLATZER I, FATTAL R, et al. Automatic recovery of the atmospheric light in hazy images[C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Computational Photography. Piscataway: IEEE, 2014: 1–11.

(下转第 186 页)

模型。实验中给出了初始定位和 GrabCut 算法求精后的定位结果,比较了初始训练网络和增加新数据后重新微调网络的结果和手机拍摄视频中的检测结果。实验结果表明,本方法能有效检测中国全部 7 大类交通标志,并获得精确的交通区域信息。重新微调训练生成新的网络模型比初始网络的平均检测精度提升了 6.6%。该方法可以将车载相机或行车记录仪等设备得到的录像中包含交通标志的帧保存下来,实现自动收集交通标志数据及其相关的信息的功能。根据新收集数据迭代训练新的网络模型,不断提升卷积网络模型的准确率。



图2 不同干扰条件下的交通标志检测结果

参考文献:

- [1] 刘华平,李建民,胡晓林,等. 动态场景下的交通标识检测与识别研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 493-503.
- [2] YUAN X, HAO X, CHEN H, et al. Robust traffic sign recognition based on color global and local oriented edge magnitude patterns [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1466-1477.
- [3] HUANG Z, YU Y, GU J, et al. An efficient method for traffic sign recognition based on extreme learning machine [J/OL]. IEEE Transactions on Cybernetics, (2016) [2016-11-01]. <http://www3.ntu.edu.sg/home/egbhuang/pdf/ELM-Traffic-Sign-Recognition.pdf>.
- [4] LIU C, CHANG F, CHEN Z. Rapid multiclass traffic sign detection in high-resolution images [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2394-2403.
- [5] PEI D, SUN F, LIU H. Supervised low-rank matrix recovery for traffic sign recognition in image sequences [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 241-244.
- [6] MATHIAS M, TIMOFTE R, BENENSON R, et al. Traffic sign recognition — How far are we from the solution? [C]// Proceedings of the 2013 IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE, 2013: 1-8.
- [7] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [C]// Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2014: 580-587.
- [8] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904-1916.
- [9] GIRSHICK R. Fast R-CNN [C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2015: 1440-1448.
- [10] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J/OL]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016. [2016-11-01]. http://machinelearning.wustl.edu/ml-papers/paper_files/NIPS2015_5638.pdf.
- [11] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2016: 779-788.
- [12] LIU W, ANGELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot Multi-Box detector [C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision, LNCS 9905. Heidelberg: Springer Berlin, 2016: 21-37.
- [13] JIN J, FU K, ZHANG C. Traffic sign recognition with hinge loss trained convolutional neural networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(5): 1991-2000.
- [14] QIAN R, ZHANG B, YUE Y, et al. Robust Chinese traffic sign detection and recognition with deep convolutional neural network [C]// Proceedings of the 2015 International Conference on Natural Computation. Piscataway: IEEE, 2015: 791-796.
- [15] ZHANG H, BO W, ZHENG Z, et al. A novel detection and recognition system for Chinese traffic signs [C]// Proceedings of the 2013 32nd Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 8102-8107.
- [16] WANG L, YANG F Y. Study on the Strokes thickness of the Chinese characters on the traffic signs based on event-related brain potentials (ERP) [C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Piscataway: IEEE, 2011: 8596-8599.
- [17] HUANG K, WANG H, TANG J. Research on Chinese character height model of guide signs based on 3D technology and information processing characteristics of Chinese drivers [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering. Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准委员会. GB5768.2—2009, 道路交通标志和标线第二部分道路交通标志[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 3-5.
- [19] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. GrabCut: interactive foreground extraction using iterated graph cuts [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 309-314.
- [24] 刘言,张红英,吴亚东,等. 基于半逆法的一种快速单幅图像去雾算法[J]. 图学学报, 2015, 36(1): 68-76.
- [25] 王欣欣,何明一,和人杰,等. 基于半反图像的透射率优化降雾算法[J]. 电子设计工程, 2014, 22(22): 181-184.
- [26] 李加元,胡庆武,艾明耀,等. 结合天空识别和暗通道原理的图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4): 514-519.
- [27] 黄明晶,刘清,熊燕帆,等. 面向内河雾天图像的大气光亮度估算方法研究[J]. 交通信息, 2013, 31(3): 33-38.
- [28] 贾冬雪. 图像与去雾算法的研究与应用[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [29] 南栋,毕笃彦,马附平,等. 基于分类学习的去雾后图像质量评价算法[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 270-278.

(上接第179页)