

# 基于暗原色理论和自适应双边滤波的煤矿尘雾图像增强算法

杜明本\*, 陈立潮, 潘理虎

(太原科技大学 计算机科学与技术学院, 太原 030024)

(\* 通信作者电子邮箱 741243853@qq.com)

**摘要:**针对煤矿井下存在大量煤尘、水雾导致获取的视频图像伴有大量的噪声、分辨率低、模糊的问题,提出了一种基于暗原色理论和自适应双边滤波的煤矿尘雾图像增强算法。基于暗原色先验理论,采用自适应双边滤波代替 softmatting 过程来求取精细透射率图,并根据煤矿井下特殊环境,从新的角度求取全球大气光值、粗略透射率图,并根据图像退化模型实现图像的去噪。实验结果表明,对于分辨率为  $1024 \times 576$  的图像处理时间为 1.9 s,与 He 算法(HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 1-13.)相比,运行效率提高了 5 倍。与直方图均衡法等算法相比,所提算法有效增强了图像细节、边缘,整体上更加适合人类视觉和视频监控的要求。

**关键词:**暗原色先验理论;自适应双边滤波;图像去雾;介质传播函数;大气物理散射模型

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Enhancement algorithm for fog and dust images in coal mine based on dark channel prior theory and bilateral adaptive filter

DU Mingben\*, CHEN Lichao, PAN Lihu

(School of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** Concerning the problem that videos images captured from coal mines filled with coal dust and mist are often with quality problems such as lots of noise, low resolution and blur. To solve this problem, an enhancement algorithm for fog and dust images in coal mine based on dark channel prior theory and bilateral adaptive filter was proposed. On the basis of dark channel prior, the softmatting process was replaced with the adaptive bilateral filtering to obtain fine transmittance map. Then according to the special circumstances of coal mines, the global atmosphere light and the rough transmittance map were got from new perspective and image denoising was realized on the basis of the image degradation model. The experiment results show that the image processing time for a resolution of  $1024 \times 576$  is 1.9 s. Compared with He algorithm (HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 1-13.), the efficiency increased 5 times. Compared with other algorithms such as histogram equalization method, the proposed algorithm is effective to enhance the image detail. In this way, images can be more suitable for human vision as a whole.

**Key words:** dark channel prior theory; bilateral adaptive filtering; fog removing of image; medium transmission function; atmospheric scattering model

## 0 引言

随着煤炭技术的发展,煤炭产业在我国工业产业中所占的比例越来越大,同时煤矿安全生产问题也引起了社会的广泛关注,国家煤矿监管部门也高度重视此类安全问题。当前煤矿事故预防措施主要有两种:一种是从从业人员的角度出发,加强工作人员的安全意识、及急救应急方法,同时完善救治医疗体系,在第一时间处理好事故安全问题;第二种措施主要采用计算机技术<sup>[1]</sup>,加强对异常情况的实时监控并在有危险的情况下发出警报。智能视频监控技术就是其中一种。但由于采煤机在采煤过程中产生大量煤尘<sup>[2]</sup>,需要洒水雾来

除尘,这就导致空气湿度较大,降低了照度。在此类环境下,光经过水汽、煤尘的反射,使得对比度下降,导致获取的图像视频十分模糊,图像的特征提取变得十分困难,大大降低了图像的使用价值。因此,研究尘雾图像增强具有很重要的意义。

事实上,图像去雾的研究已经成为计算机视觉领域的一个研究热点。常用的图像增强算法可分为空间域和频域的方法<sup>[3]</sup>。频域的方法是借助小波变换等方式将图像转换到频域后再进行处理,例如同态滤波<sup>[4]</sup>。空间域的主要方法有色调映射、对比度增强等,典型的算法有 Retinex 理论<sup>[5]</sup>、自动颜色均衡化<sup>[6]</sup>等。近来,基于暗原色先验知识和大气散射模型的图像去雾技术有了长足进步。Tan<sup>[7]</sup>利用最大化局部对比

收稿日期:2014-12-15;修回日期:2015-01-23。

**基金项目:**山西省科技重大专项(20121101001);山西省科技攻关项目(20141039);山西省留学人员科研资助项目(2013-097)。

**作者简介:**杜明本(1990-),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、计算机视觉; 陈立潮(1961-),男,山西万荣人,教授,博士,主要研究方向:计算智能、群体智能、智能软件技术; 潘理虎(1974-),男,山西太原人,副教授,博士,主要研究方向:软件体系结构、软件工程、复杂系统建模。

的方法来实现图像的增强以达到去雾的目的,但此方法仅仅是增强对比度,没有考虑物理模型,导致去雾的效果不是很好。Fattal<sup>[8]</sup>利用独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)的方法,假设传输率与物体表面阴影不相关,但此方法仅仅是基于对颜色的统计,对于雾气较浓的情况效果不是很理想。He等<sup>[9]</sup>提出基于暗原色先验知识的图像去雾方法(以下简称He算法),此方法是利用暗原色分布规律得到图像的粗略透射率图,然后利用软抠图的方法对粗略透射率图进行细化,接着根据大气散射模型达到去雾的目的。研究发现,此方法计算复杂度、空间复杂度较大,处理速度较慢而且可能引起噪声的放大。总结以上方法,本文在深入研究He算法基础上,为满足实时性和有效性的要求,在基于暗原色去雾方法的基础上,提出了一种实时性的煤矿尘雾图像清晰化方法。针对He采用的计算较复杂的softmatting过程,采用既能去噪又能保持图像边缘的自适应双边滤波,提高了运行效率;同时针对煤矿井下特殊环境,改进了求取透射率、大气光值的方法,提高景深。

## 1 相关理论

在煤矿井下环境中存在着大量水汽、煤尘,获取的图像是经过水汽、煤尘等散射和吸收的,导致所获取的图像十分模糊、颜色失真,去雾后的图像应该更加清晰,对比度得到增强。

### 1.1 暗通道原理

暗原色先验理论<sup>[9]</sup>是基于对大量户外无雾图像观察得到的,在绝大多数非天空或空白区域,总会存在某些像素值在一个通道具有很低的值,该值趋于或等于零。对于一幅图像的暗通道图可以这样定义:

$$J^{\text{dark}}(x, y) = \min_{C \in \{R, G, B\}} \left( \min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} J^C(i, j) \right) \quad (1)$$

式中:  $J^C$  表示  $J$  中的一个通道,  $\Omega(x, y)$  表示以  $(x, y)$  为中心的矩形区域,  $J^{\text{dark}}(x, y)$  表示暗通道图像。经观察除天空、空白处以外其他区域:

$$J^{\text{dark}}(x, y) \rightarrow 0 \quad (2)$$

此称为暗原色先验理论。

图1为煤矿井下任意图像,图2为其暗通道图。可以看出其暗通道图的像素值趋于零。暗通道中的像素趋于或等于零的原因有3个:

- 1) 物体的阴影,比如:楼房、树木的阴影等;
- 2) 色彩鲜艳的物体,比如:红色的衣服、绿色的树叶等;
- 3) 黑色物体,比如:黑色的墙壁等。

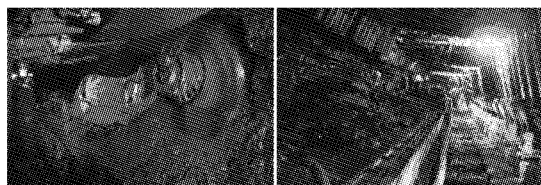


图1 原图

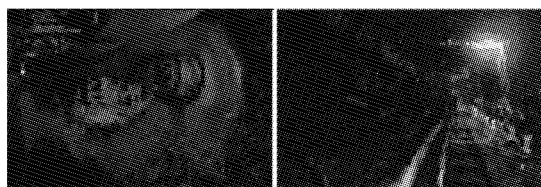


图2 暗通道图

### 1.2 尘雾图像退化模型

Narasimhan等<sup>[10]</sup>给出了在计算机视觉中常用的尘雾图像退化模型:

$$I(i, j) = J(i, j)t(i, j) + A(1 - t(i, j)) \quad (3)$$

其中:  $I(i, j)$  是退化后的尘雾图像,  $J(x, y)$  为未退化的原始图像,  $A$  为全球大气光成分,  $t(i, j)$  为介质传播函数, 又称透射率可表示为:

$$t(x, y) = e^{-\beta d(x, y)} \quad (4)$$

其中:  $\beta$  为衰减系数,  $d(x, y)$  为景深。由式(3)可知, 大气散射模型由两项组成: 第1项  $J(i, j)t(i, j)$  为衰减模型, 也称直接衰减, 表示场景的反射光未被散射的部分, 其随着场景景深的增大而衰减; 第2项  $A(1 - t(i, j))$  为大气散射模型, 它导致图像对比度下降。增强的目的是通过  $I(x, y)$  恢复得到  $J(i, j)$ 。对式(3)做变形可得:

$$t(i, j) = t(i, j) \frac{J^C(x, y)}{A^C} - \frac{I^C(x, y)}{A^C} + 1 \quad (5)$$

假设  $t(i, j)$  为常数, 对式(4)取两次最小化得:

$$t(i, j) = t(i, j) \min_{C \in \{R, G, B\}} \left( \min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} \frac{J^C(x, y)}{A^C} \right) - \min_{C \in \{R, G, B\}} \left( \min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} \frac{I^C(x, y)}{A^C} \right) + 1 \quad (6)$$

由暗原色先验理论得:

$$J^{\text{dark}}(x, y) = \min_{C \in \{R, G, B\}} \left( \min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} J^C(i, j) \right) \rightarrow 0 \quad (7)$$

最终得到粗略透射率图像公式:

$$t(i, j) = 1 - \min_{C \in \{R, G, B\}} \left( \min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} \frac{I^C(x, y)}{A^C} \right) \quad (8)$$

## 2 煤矿井下尘雾图像增强算法

暗原色先验理论是指一些像素在某个通道的值趋于零, 但其不适用于大面积天空或空白区域。考虑到煤矿井下照明不好, 有大量表面较暗的岩石以及大型机械的阴影, 同时没有天空区域, 所以采用该理论。为验证该理论同样适用于煤矿井下, 笔者随机选取了200张煤矿井下清晰图像, 得出其暗原色图像的直方图, 从图3中可以看出: 93%的像素值低于50, 从而验证了采用此理论的正确性。

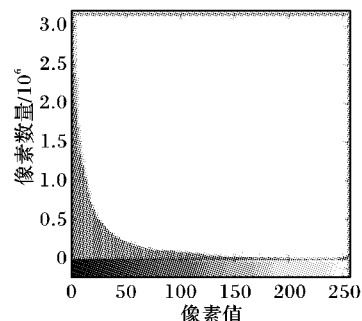


图3 像素统计图

### 2.1 粗略透射率图估计

考虑到现实生活中, 即使在正常情况下也会受到雾气、空气中颗粒的影响, 所以当人们看远处物体时雾依然是存在的。而且雾的存在是人们感知景深的一个基本线索, 远处的物体受雾气影响程度较大, 如果彻底地移除雾的存在, 图像会看起来不真实, 并且深度感会丢失。为保证图像色彩的真实性对式(8)引入一个参数  $\lambda$ :

$$t_1(i, j) = 1 - \lambda \min_{C \in \{R, G, B\}} \left( \min_{(i, j) \in \Omega(x, y)} \frac{I^C(x, y)}{A^C} \right) \quad (9)$$

经测试  $\lambda$  取值为 0.98 时效果最好, 本文所有实验结果依赖于此值。

## 2.2 自适应双边滤波器

双边滤波<sup>[11]</sup>由两个函数组成, 同时考虑了空间域和值域的差别, 一个函数是由几何空间距离决定滤波器系数; 另一个由像素差值决定滤波器系数, 高低通滤波器和 $\delta$ -截尾均值滤波器。因此双边滤波算法既可以达到去噪又可以保证图像边缘特征。双边滤波可定义为:

$$f[x] = \left\{ \sum_{n \in \Omega} W[x, n] g[n] \right\} * \left\{ \sum_{n \in \Omega} W[x, n] \right\}^{-1} \quad (10)$$

式中:  $f$  为滤波处理后图像,  $g$  为退化后图像,  $\Omega$  为第  $x$  个样本像素的邻域范围,  $n \in \Omega$  高斯核函数。其中:

$$W(x, n) = W_d[x, n] * W_r[x, n] \quad (11)$$

$$W_r[x, n] = \exp\left(-\frac{d_d^2(x, (x-n))}{2\sigma_r^2}\right) = \exp\left(-\frac{(g[x] - g[x-n])^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (12)$$

$$W_d[x, n] = \exp\left(-\frac{d_d^2(x, (x-n))}{2\sigma_d^2}\right) = \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (13)$$

实验表明, 该模型依赖于  $\sigma_r$  的选择, 选择较大  $\sigma_r$  的会使图像过度平滑; 选择较小的  $\sigma_r$  会导致图像出现较多与其他区域不同的奇点, 同时会出现一些斑点。为了克服这些缺点, 基于 Lin<sup>[12]</sup>的思路本文采用自适应的双边滤波器。其定义为:

$$W(x, n) = W_d[x, n] * W_r[x, n] = \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_d^2}\right) \exp\left(-\frac{(g[x, n] - g[x-n] - \gamma[x-n])^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (14)$$

即在传统的双边滤波基础上, 添加一个补偿函数  $\gamma$ , 取 MIN, MAX, AVG 分别代表滑动窗口内像素值最小值 (Minimum, MIN)、最大值 (Maximum, MAX)、平均值 (Average, AVG), 同时令  $\Delta = g[m_0, n_0] - AVG$ , 则有以下三种情况:

- 1)  $\gamma = 0$ , 即传统的双边滤波。
- 2)  $\gamma = \Delta$  向着 AVG 方向变化。
- 3) 背离 AVG 向 MIN 或 MAX 方向变化:

$$\gamma = \begin{cases} MAX - g[m_0, n_0], & \Delta > 0 \\ MIN - g[m_0, n_0], & \Delta < 0 \\ 0, & \Delta = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中  $\gamma$  的值取决于该像素的值高于还是低于中心像素的值。当朝向 AVG 方向变化时, 图像会变得模糊; 当背向 AVG 变化时, 图像会被锐化。这样可以在最大限度保证图像边缘的同时实现图像去噪。

## 2.3 粗略透射率图优化与去噪

在 He 算法中使用 softmatting 过程对粗略透射率图进行细化。该算法在计算过程中需要构建 Matting Laplacian 矩阵, 用此矩阵的高度乘以图像的宽度, 导致算法的空间复杂度和时间复杂度较高, 运算速度较慢。分析式(4)可知, 在景深变化缓慢的区域, 透射率同样变化缓慢, 而对于图像的边缘部分, 景深变化较快, 导致透射率也发生跃变。因此, 为保证其边缘特征, 故采用自适应双边滤波器。

$$t_{ap} = W(x, n) * t_1 \quad (16)$$

其中:  $t_1$  为粗略透射率图,  $t_{ap}$  为经自适应双边滤波处理后的图像。其中:

$$W(x, n) = \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_d^2}\right) \exp\left(-\frac{(g[x, n] - g[x-n] - \gamma[x-n])^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (17)$$

## 2.4 全球大气光值 $A$ 的估计

全球大气光值  $A$  的估计, 主要利用图像中不透明的浓雾区域的像素得出。Liu 等<sup>[13]</sup>直接利用像素最高值来估计全球大气光值, 但这种估算方法不准确, 此类光可能来自环境中的光源, 因此采用暗原色值来估计大气光值。具体步骤如下:

- 1) 计算得到暗通道图。
- 2) 从暗通道图中按照亮度的大小取前 0.08% 的像素。
- 3) 在这些位置中, 在原始有雾图像  $I$  中寻找对应的具有最高亮度的点的值  $(r, g, b)$ , 作为  $A$  值。

根据煤矿井下实际情况, 若取其中的原始像素的某一个点的值作为  $A$  值, 则各通道的  $A$  值很可能接近 255, 这样就会造成处理后的图像出现大量色斑, 所以采取符合条件值的平均值作为  $A$  的值, 并设置一个参数, 当  $A$  的值大于该值时, 就取该值。

## 2.5 图像复原

由尘雾图像退化模型(1)可知复原图像:

$$J(i, j) = \frac{I(i, j) - A}{t(i, j)} + A \quad (18)$$

但考虑到煤矿井下噪声较多, 当透射率  $t$  的值很小时, 导致  $J$  很大, 使图像偏于白场, 本文算法设置阈值  $T_0$ , 当  $t$  小于  $T_0$  时, 取  $T_0$  的值, 所以最终增强公式为:

$$J(i, j) = \frac{I(i, j) - A}{\max(t(i, j), T_0)} + A \quad (19)$$

综上所述, 基于暗通道先验理论和自适应双边滤波的尘雾图像增强算法流程如图 4 所示。

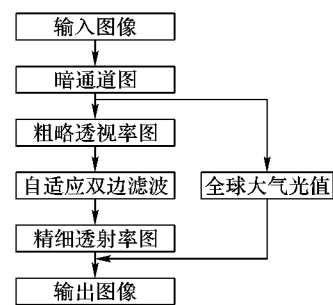


图4 本文算法流程

## 3 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性, 本文采用了山西某煤矿多个监控视频图像在操作系统为 Windows7、CPU 为酷睿 I5、内存为 2 GB 的计算机上进行了实验。图 5 表示了算法的整个过程, 可以看出经过本文算法的处理, 图像的清晰度、对比度等得到了明显提高。目前常用的图像增强评价标准有两种: 一种是主观评价, 主要利用人眼直接观察图像效果, 这种方式易受主观因素的影响; 一种是客观标准, 包括对图像定量描述的方差、图片信息熵、对比度提升指数等。

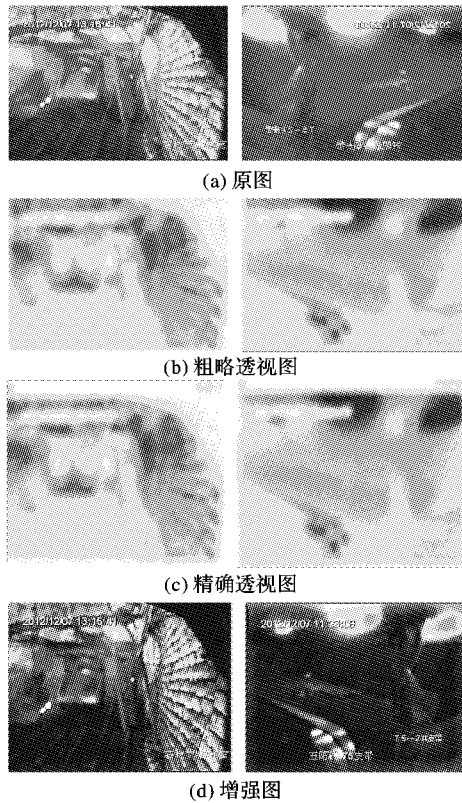


图5 算法的主要过程

3.1 主观评价

如图 6 所示,在煤矿井下受煤尘、光照等因素的影响,图像十分模糊,经本文算法处理后(如图 6(b)所示),图片的对比度、细节、清晰度都得到了明显提高,更加适合人类视觉标准。

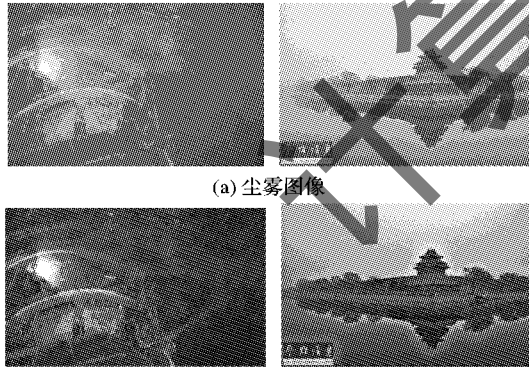


图6 本文增强效果

3.2 客观评价

为进一步分析本文算法的时间复杂度、图像增强的效果、清晰度等,采用常用的几种评价标准<sup>[14]</sup>包括方差( $\sigma^2$ )、信息熵(Information Entropy, IE)、对比图提升指数(Contrast Improvement Index, CII)等,并与直方图均衡法、Tan 算法和 He 算法进行比较。表 1 给出了几种图像增强评价标准的对比结果,结果表明本文算法在图像对比度、细节、清晰度方面效果很好。

如图 7(a)是取自煤矿井下伴有噪声的在尘雾环境中的图片;图 7(b)是采用直方图均衡化处理后的结果,可以看出图像对比度明显增强,但噪声也明显变大,局部对比度过大,图像细节丢失;图 7(c)是采用 Tan 的算法处理的结果,可以

看出同样存在噪声变大的缺点并且图像细节丢失,尤其是图像轮廓模糊不清;图 7(d)是采用 He 算法处理的结果,图像的清晰度得到了很好的改善,但存在图像细节恢复不清晰、图像纹理信息丢失的缺点,墙面、衣服等相关纹理细节被忽略;图 7(e)是采用本文算法处理的结果,能较好地增强图像的细节、边缘使图像清晰且色彩饱和度自然。表 2 给出了不同算法下的运算时间,可以看出本文算法运算速度占有很大优势,比 He 算法提高了近 5 倍。

表 1 复原图像清晰度比较

| 算法     | $\sigma^2$ | IE     | CII   |
|--------|------------|--------|-------|
| 直方图均衡法 | 75         | 12.301 | 4.131 |
| Tan 算法 | 130        | 13.603 | 2.53  |
| He 算法  | 156        | 14.039 | 2.596 |
| 本文算法   | 203        | 15.844 | 1.506 |

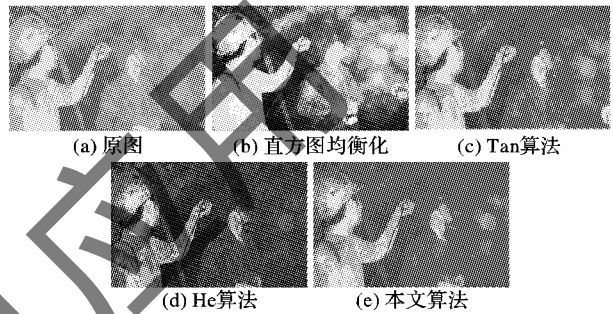


图7 增强效果对比

表 2 各算法运行时间比较

| 算法     | 图 5(d) 左 | 图 5(d) 右 | 图 7    |
|--------|----------|----------|--------|
| 直方图均衡法 | 0.635    | 1.121    | 1.963  |
| Tan 算法 | 12.654   | 13.862   | 15.564 |
| He 算法  | 8.625    | 10.165   | 11.962 |
| 本文算法   | 1.423    | 1.962    | 2.569  |

4 结语

为保证视频监控技术能在煤矿井下存在雾气、煤尘、光照度不高的环境中得到更好的应用,为图像特征提取提供清晰的图片。本文基于 He 等提出的暗原色理论,在计算全球大气光值、透射率图时根据煤矿具体的环境特征设置阈值,同时用自适应双边滤波来代替 softmatting 复杂的计算过程,在提高运算速度、去噪的同时,保持了图像的边缘特征。实验证明,本文算法具有很高的运行效率能够提高尘雾图像的对比度、清晰度,使增强后的图像细节丰富。下一步工作主要研究如何自动获取更加有效的全球大气光值和精细透射率图,以便使增强图像的色彩更加丰富、逼真。

参考文献:

- [1] CHEN J, XIE S, PAN N. Application of computer intelligent monitoring network in coal mine production[J]. Coal Technology, 2014, 33(2): 73 - 75. (陈娟, 谢圣权, 潘能勇. 计算机智能监控网络在煤矿生产中的应用[J]. 煤炭技术, 2014, 33(2): 73 - 75.)
- [2] LI D, GUO S. Situation and development direction of dust prevention and treatment for China coal mine[J]. Metal Mine, 2009, 9 (11): 747 - 752. (李德文, 郭胜均. 中国煤矿粉尘防治的现状与发展方向[J]. 金属矿山, 2009, 9(11): 747 - 752.)

(下转第 1448 页)

从应用的角度来看,鱼眼图像校正技术的发展可以促进公共场所大视场监控的自动化进程,以及降低全景监控的设备成本和布署难度,在未来的工作中,我们打算进一步改进校正方法,使鱼眼图像的校正过程自动化,并应用到智能交通监控中。

#### 参考文献:

- [1] SNYDER J P. Flattening the earth: two thousand years of map projections[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1997: 263 - 266.
  - [2] ZORIN D, BARR A H. Correction of geometric perceptual distortions in pictures[C]// Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1995: 257 - 264.
  - [3] ZELNIK-MANOR L, PETERS G, PERONA P. Squaring the circle in panoramas[C]// Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2005: 1292 - 1299.
  - [4] KOPF J, LISCHINSKI D, DEUSSEN O, *et al.* Locally adapted projections to reduce panorama distortions[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(4): 1083 - 1089.
  - [5] SWAMINATHAN R, NAYAR S K. Nonmetric calibration of wide-angle lenses and polycameras[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1172 - 1178.
  - [6] DEVERNAVY F, FAUGERAS O. Straight lines have to be straight[J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13(1): 14 - 24.
  - [7] KANNALA J, BRANDT S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335 - 1340.
  - [8] HARTLEY R, KANG S B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(8): 1309 - 1321.
  - [9] YANG L, CHENG Y. The designing methods of fish-eye distortion correction using latitude-longitude projection[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010(6): 19 - 22. (杨玲, 成运. 应用经纬映射的鱼眼图像校正设计方法[J]. 工程图学学报, 2010(6): 19 - 22.)
  - [10] YING X, HU Z. Fisheye lense distortion correction using spherical perspective projection constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1702 - 1708. (英向华, 胡占义. 一种基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1702 - 1708.)
  - [11] WEI J, LI C, HU S, *et al.* Fisheye video correction[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(10): 1771 - 1783.
  - [12] CARROLL R, AGRAWALA M, AGARWALA A. Optimizing content-preserving projections for wide-angle images[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 43.
  - [13] WANG D, CUI H, CHEN J. Improvement of fisheye image edge extraction algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(12): 2878 - 2880. (王大宇, 崔汉国, 陈军. 鱼眼图像轮廓提取及校正研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(12): 2878 - 2880.)
  - [14] TAUBIN G. Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(11): 1115 - 1138.
  - [15] PRATT V. Direct least-squares fitting of algebraic surfaces[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 145 - 152.
  - [16] KASA I. A circle fitting procedure and its error analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1976, 1001(1): 8 - 14.
  - [17] FLECK M M. Perspective projection: the wrong imaging model[R]. Iowa: University of Iowa, 1995: 1 - 27.
- 
- (上接第1438页)
- [3] XU X. Research on image enhancement methods and applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (许欣. 图像增强若干理论方法与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.)
  - [4] AI-AMTI S S, KALAYANKAR N V, KHAMITKAR S D. Linear and non-linear contrast enhancement image[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2010, 10(2): 139 - 143.
  - [5] MELAN L, SUSSTRUNK S. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820 - 2830.
  - [6] RIZZI A, GATTA C, MARINI D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(11): 1663 - 1677.
  - [7] TAN R. 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): 1 - 9.
  - [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): 1 - 13.
  - [10] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Interactive weathering of an image using physical model[C]// Proceedings of the 2003 ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 1387 - 1394.
  - [11] BARASH D. Bilateral filtering and anisotropic diffusion: towards a unified viewpoint[EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2000/HPL-2000-18R1.pdf>.
  - [12] LIN H, SHI C. A bilateral adaptive filter used in ultrasonic image denosing[J]. Journal of Jiangnan University: Nature Science Edition, 2010, 9(2): 169 - 172. (林红章, 石澄贤. 一种自适应双边滤波的超声图像去噪[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2010, 9(2): 169 - 172.)
  - [13] LIU C, JIN W, CHEN Y, *et al.* A self-adaptive nonuniformity correction algorithm for infrared images combined with two-point correction along the rim[C]// Proceedings of the 2010 International Computer Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 240 - 250.
  - [14] FANG S, WANG Y, CAO Y, *et al.* Restoration of image degraded by haze[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 10(10): 2279 - 2284. (方帅, 王勇, 曹洋, 等. 单幅雾天图像复原[J]. 电子学报, 2010, 10(10): 2279 - 2284.)