

# 基于曲波变换的图像去雾算法研究

李 飞,丁若修,张志佳

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110870)

**摘 要:**图像去雾技术的目的是去除摄像头采集图像过程中雾、霾等复杂天气因素对图像的干扰,保留图像目标的细节信息,提高图像的整体质量。通过对比晴天图像和雾霾条件下图像,分析雾霾颗粒对图像的影响,并研究离散曲波变换理论,提出了一种基于离散曲波变换并结合高斯函数滤波的图像去雾方法。该算法对图像进行高斯函数滤波,优化图像质量,缩短算法处理时间,通过改进的离散曲波变换算法,使图像的清晰度和对比度达到正常图像水平。对比处理前后图像的信噪比和信息熵等客观参数,证实了基于离散曲波变换的图像去雾算法,对雾霾天气下的图像有明显的去除雾霾效果,得到的增强图像保留了较多的图像信息,图像清晰程度明显提升,扩展了户外视觉系统的应用范围。

**关键词:**图像去雾;曲波变换;高斯函数;图像质量

中图分类号:TN911.73

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)07-0065-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.07.015

## Research on Image Defogging Algorithm Based on Curvelet Transform

LI Fei, DING Ruo-xiu, ZHANG Zhi-jia

(College of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology,  
Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The goal of image defogging technology is to remove haze interference of camera capturing images under complex weather conditions, such as fog, thus the detail information of image target has been retained and the overall quality of the image has been improved. By comparing the sunny image with the image under haze conditions, the influence of haze particles on the image has been analyzed and the theory of curvelet transform has been studied. The method of image defogging based on curvelet transform and combined with Gauss function filtering has been proposed. The algorithm has adopted Gauss function filtering dealing with images for optimizing the quality of image and shortening its transformation time, and then improving discrete curvelet transform algorithm makes the image clarity and contrast to normal level. Compared with objective parameters of processing the image signal-to-noise ratio and information entropy before and after the images, it has been proved that the image defogging discrete algorithm based on discrete curvelet transform has obvious effect of removing haze in the haze weather image, and the enhanced image retains more image information, the image clarity has been obviously improved to extend to the outdoor application range of the visual system.

**Key words:** image defogging; curvelet transform; Gauss function; image quality

## 0 引 言

在现代社会,各种户外场景都在使用计算机视觉系统,特别在交通领域,其发挥了很大作用,如城市交通视频监控、航空辅助驾驶、航拍遥感成像等。室外的天气情况复杂易变,诸如雾、霾等天气条件,空气中充斥着大量水滴和微小颗粒,这些悬浮物的衍射光线,导致摄像头采集的图像质量严重下降,极大地影响和限制了计算机视觉系统在室外环境的应用。从 20 世纪 90 年代至今,人们不断研究图像去雾技术,在计算机

视觉领域,图像去雾技术的研究也颇具成果<sup>[1]</sup>。图像去雾的实质就是对模糊图像清晰化的算法研究,使雾霾天气条件下的图像恢复原本的彩色亮度和高对比度,保证图像具有较高的信噪比和足够多的信息熵<sup>[2]</sup>。

目前已有的几种主流去雾算法,在运算过程中存在各自的优缺点,都有需要改善的方面。在室外条件下,为了使计算机视觉系统在光线复杂且多变的大气环境中提升采集的图像质量,扩大视觉系统在交通领域的应用范围,要求算法能较好地提高图像质量,突出

收稿日期:2016-08-08

修回日期:2016-11-16

网络出版时间:2017-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61540069)

作者简介:李 飞(1978-),女,博士研究生,讲师,研究方向为计算机视觉、生物特征识别。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170605.1508.054.html>

目标物体信息,且运算时间要短<sup>[3]</sup>。为此,提出了一种基于曲波变换的图像去雾方法,对视频图像进行高斯函数滤波,优化图像,缩短算法变换时间,通过改进的离散曲波变换使图片变换为曲波系数,进行算法处理,得到去雾图像。处理后的图像具有较高的信噪比信息熵,去雾效果明显,突显了图像目标的细节信息。

## 1 高斯函数滤波

为了提高曲波变换的效率,先对图片进行高斯滤波运算,高斯函数如下所示:

$$\text{Gauss} = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

如图 1 所示,高斯函数在参数不同时,函数曲线表现的形态不同,对图像进行平滑处理,使图像色彩自然时应调大参数  $\sigma$ ,对图像进行锐化处理,突出图像细节信息时应调小参数  $\sigma$ 。对不同图像要适当调整高斯函数标准差  $\sigma$ 。

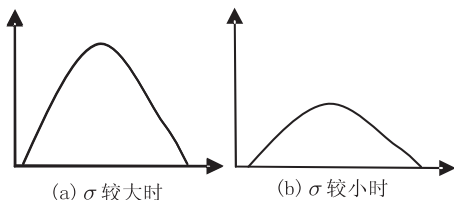


图 1 高斯函数

镜头对物体的成像颜色是由物体对光源光线中光学三原色的反射能力决定的,成像颜色不受光源光线的强度和光线照射分布的影响,物体颜色具有不变性<sup>[4]</sup>。为此,会对图像中除目标物体以外的干扰物体的照射分量进行估算,去除这部分照射分量后,再进行高斯运算,减少运算量,缩短算法时间。

由图 2 可知,一幅图像可以假设由目标物体的反射光分量和其他干扰物反射光分量组成,如下所示:

$$\text{Image}(x, y) = \text{Goal}(x, y) \cdot \text{Other}(x, y) \quad (2)$$

其中,  $\text{Image}(x, y)$  表示镜头采集到的目标物体图像;  $\text{Other}(x, y)$  表示干扰物体的入射光;  $\text{Goal}(x, y)$  表示目标物体的反射光。

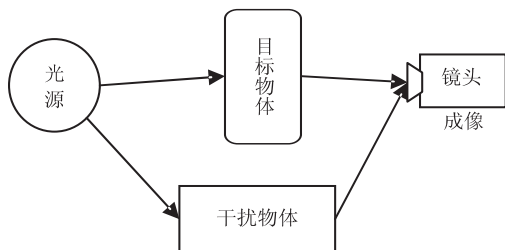


图 2 理论原理图

对式(2)运行对数运算,得到:

$$\log \text{Image}(x, y) = \log \text{Goal}(x, y) + \log \text{Other}(x, y) \quad (3)$$

理论认为,其他干扰物质的反射光对目标物体的成像并无本质影响,只干扰最后的成像质量。实验的目的就是通过运算处理,估算出干扰物的光分量  $\text{Other}(x, y)$ ,再通过高斯函数滤波,将其去除,如下所示:

$$\text{Other}(x, y) = \text{Gauss}(x, y) * \text{Image}(x, y) \quad (4)$$

所以,目标物体光分量为:

$$\log \text{Gual}(x, y) = \log \text{Image}(x, y) - \log \text{Other}(x, y) \quad (5)$$

## 2 快速离散 Curvelet 变换

在傅里叶分析理论提出后,小波变换理论的提出给许多相关领域提供一种新方法。室外环境中,交通领域的视觉系统采集的目标图像含有较多线条信息,尤其是对目标物体的轮廓信息要求很高,小波变换对于图像的纹理特征表现不足,变换过程中会出现目标物体图像的边缘特征丢失等情况。为此, Candes 提出了对线条解析力很强的脊波变换理论<sup>[5]</sup>,但该理论主要针对直线,对复杂的线条解析不够。

针对脊波变换理论的不足, Candes 和 Donoho 共同提出了曲波 (Curvelet) 变换理论<sup>[6]</sup>,曲波变换提升了复杂线条的处理能力,但变换过程冗杂,变换时间也很长。之后,他们又提出了新的曲波变换框架体系,称为第二代曲波变换,较之第一代,简化了变换理论的运算过程,使曲波变换的效率大大提升。2005 年,为了节约算法时间,他们又提出了两种基于第二代曲波变换理论的增强型离散曲波变换<sup>[7]</sup>实现方法,基于非均匀采样的快速傅里叶变换算法 (US-FFT 算法) 和基于封装的变换算法 (Wrap 算法)<sup>[8]</sup>。比起原来的变换方法,这些方法运算过程更简单,变换更快速省时,使离散曲波变换能够应用于图像去雾霾的研究中。

时域坐标系下的  $f[t_1, t_2]$  ( $0 \leq t_1, t_2 \leq n$ ) 为输入,离散曲波变换的表达形式为:

$$\text{Cur}^D(l, m, n) = \sum_{0 \leq t_1, t_2 \leq n} f[t_1, t_2] \overline{\varphi_{l, m, n}^D[t_1, t_2]} \quad (6)$$

采用的带通函数为:

$$\psi(\omega_1) = \sqrt{\varphi(\omega_2/2)^2 - \varphi(\omega_1)^2} \quad (7)$$

用该函数对目标进行尺寸划分,对每一个  $\omega = (\omega_1, \omega_2)$ ,  $\omega_1 > 0$ , 有:

$$V_j(\mathbf{S}_{\theta_i} \omega) = V(2^{j/2} \omega_2 / \omega_1 - 1) \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{S}_{\theta_i}$  的矩阵表达式为  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\tan\theta & 1 \end{pmatrix}$ 。

分割出的条形区域边界线的斜率是等间隔增加的<sup>[9]</sup>。图 3 为离散曲波变换的示意图,参数尺度  $j=6$ , 角度  $l=8$ 。定义:

$$U_j(\omega) = \psi_j(\omega_1) V_j(\omega) \quad (9)$$

针对每一个  $\theta_l \in (-\pi/4, \pi/4)$ , 有:

$$U_{j,l}(\omega) = \psi_j(\omega_1) V_j(S_\theta \omega) = U_j(S_\theta \omega) \tag{10}$$

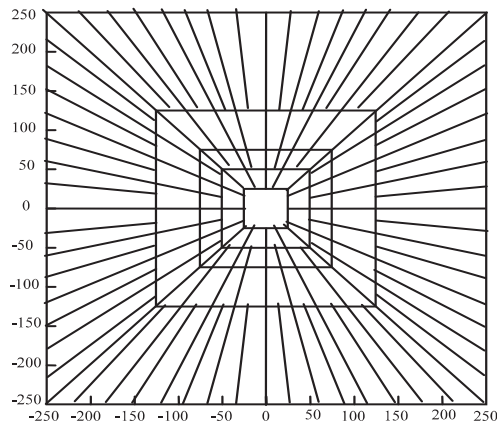


图3 离散曲波变换的分割示意图

快速离散曲波变换 (Curvelet) 具有简单快速等优势,能够缩短算法时间。根据快速离散曲波变换理论可知变换后的曲波系数分布情况,系数较大的部分是图像的细节信息和线条轮廓,系数较小的部分是图像的空白和图像里的干扰信号<sup>[10]</sup>。为了进一步减少运算时间,对曲波变换进行改进,对于比阈值小的系数,其对运算的结果影响不大,不能决定最后的图像质量,所以运算过程中,可直接跳过比阈值小的系数的运算,再对比阈值大的系数重点变换,以实现图像去雾<sup>[11]</sup>。采用自动调整的阈值方法确定曲波系数。算法如下:

$$\text{Cur}^D(l,m,n) = \begin{cases} \frac{\text{Cur}_0^D(l,m,n)}{\text{thr}} \text{Cur}_0^D(l,m,n), & \text{Cur}_0^D(l,m,n) < 0 \\ \text{Cur}_0^D(l,m,n), & \text{Cur}_0^D(l,m,n) > 0 \end{cases} \tag{11}$$

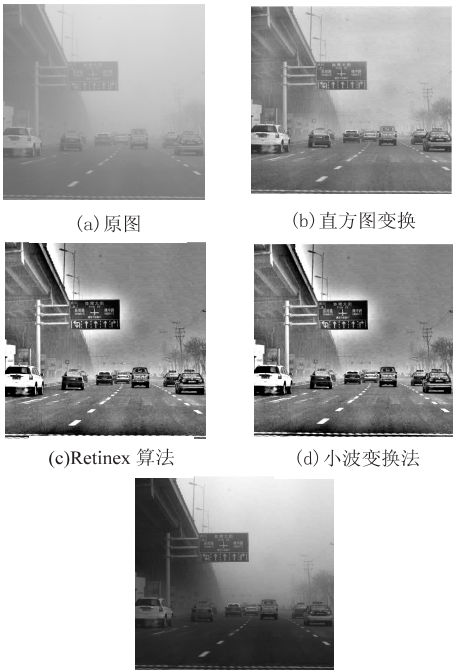
其中,  $\text{Cur}_0^D(l,m,n)$  为处理前的曲波系数;  $\text{Cur}^D(l,m,n)$  为处理后的曲波系数; thr 为曲波系数的阈值。

3 算法步骤与实验结果

算法步骤如下:

- (1)将图像进行高斯函数滤波,求出目标物体反射光图像。
- (2)通过改进的快速离散曲波变换,对得到的图像进行运算处理,求出最终图像。
- (3)将算法处理后的图像与其他三种主流去雾算法进行主观和客观对比,分析算法的优缺点,并得出结论。

为了说明算法的优缺点,选取雾霾图像和三种主流去雾方法进行实验对比,即直方图变换法<sup>[12]</sup>(方法1)、Retinex 算法<sup>[13]</sup>(方法2)、基于小波变换的去雾算法<sup>[14]</sup>(方法3),如图4所示。



(e) 提出方法

图4 各种去雾方法对比

对处理后的图像进行主观评价和客观评价,主观评价主要考察图片视觉效果,客观评价计算图片峰值信噪比 (PSNR) 和图像信息熵。PSNR 定义为:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\text{MSE}} \tag{12}$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{m \times n} [x(i,j) - y(i,j)]^2 \tag{13}$$

其中, MSE 为均方误差;  $x(i,j)$  为原始图像;  $y(i,j)$  为提出方法处理后的图像。

图像信息熵定义为:

$$H(x) = - \sum_{i,j=1}^n p(x,y) \times \log p(x,y) \tag{14}$$

其中,  $p(x,y)$  为图像像素出现的概率<sup>[15]</sup>。

各种方法的实验数据对比见表1。

表1 各种方法的实验数据对比

图像去雾方法	处理时间/s	信噪比	信息熵
直方图变换法	0.208	16.407	5.098
Retinex 算法	1.089	17.886	5.906
基于小波变换算法	1.712	19.087	6.398
所提算法	2.088	20.980	6.767

4 结束语

针对现阶段主流图像去雾算法的不足,提出一种基于快速离散曲波变换的去雾算法,并通过算法改进,缩短了变换时间,使修复后图像达到了较好的质量,发挥了快速离散曲波变换在轮廓纹理和曲线结构上的优

内部动作隐藏,可以用构件交互自动机描述如下:

$$M_4 = (\{p_0, p_1\}, \{p_0\}, \{a, b\}, \{(M_4, a, +), (M_4, b, -)\}, F^A, F^V, (M_4))$$

4 结束语

为了形式化描述系统中大量的数据约束,在AADL建模语言及构件交互自动机研究的基础上,结合Z语言和自动机的优点,对构件交互自动机运用Z语言进行扩充,通过具体实例给出AADL模型到构件交互自动机的形式化转换规则,推动了AADL模型的形式化验证的进程。

参考文献:

[1] Yang Z, Hu K, Ma D, et al. From AADL to timed abstract state machines; a verified model transformation[J]. Journal of Systems & Software, 2014, 93(2): 42-68.

[2] 吴育春. 基于AADL的嵌入式软件形式化验证研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.

[3] Vareková P, Zimmerova B. Component-interaction automata for specification and verification of component interactions [C]//Proceedings of the IFM 2005 doctoral symposium on integrated formal methods. [s. l.]: [s. n.], 2005: 71-75.

[4] Brim L, Ivana Č, Vařeková P, et al. Component-interaction automata as a verification-oriented component-based system specification[J]. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes,

2005, 31(2): 19-21.

[5] Zimmerova B, Vařeková P, Beneš N, et al. Component-interaction automata approach (CoIn) [M]//The common component modeling example. Berlin: Springer, 2008: 146-176.

[6] 贾仰理, 张振领, 李舟军. 基于自动机的构件实时交互行为的形式化模型[J]. 计算机科学, 2010, 37(9): 151-156.

[7] 张玉玉. 基于约束交互自动机的构件行为一致性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[8] Cao Z. Temporal logics and model checking algorithms for ZI-As [C]//2nd international conference on software engineering and data mining. [s. l.]: IEEE, 2010: 57-62.

[9] 张岩, 胡军, 于笑丰, 等. 接口自动机—一种用于组件组合的形式系统[J]. 计算机科学, 2005, 32(11): 212-217.

[10] 陈伟, 薛云志, 赵琛, 等. 一种基于时间自动机的实时系统测试方法[J]. 软件学报, 2007, 18(1): 62-73.

[11] Bowen J P. Formal specification and documentation using Z: a case study approach [M]. London: International Thomson Computer Press, 1996.

[12] 杨志斌, 皮磊, 胡凯, 等. 复杂嵌入式实时系统体系结构设计与分析语言: AADL[J]. 软件学报, 2010, 21(5): 899-915.

[13] 董云卫, 王广仁, 张凡, 等. AADL模型可靠性分析评估工具[J]. 软件学报, 2011, 22(6): 1252-1266.

[14] 舒新峰, 张炎龙, 孙林泽. 基于Spin的地铁门控制系统建模与验证[J]. 西安邮电大学学报, 2015, 20(5): 57-61.

(上接第67页)

势,对图像中目标的轮廓边缘进行锐化,使目标清晰,提高了图像的主观可视效果和客观参数。通过客观数据证明,与其他三种主流的去雾算法相比,处理后的图像中目标轮廓明显,细节清楚,噪声明显减少,可以保证图像用于后期处理,使其处理后的图像边缘纹理更加清晰。

参考文献:

[1] 李滚, 吴劼夫, 雷志勇. 图像雾霾等级评价及去雾技术研究进展[J]. 激光杂志, 2014, 35(9): 1-6.

[2] 李庆义. 计算机图像处理技术综述[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(11): 226-228.

[3] 方莉, 张萍. 经典图像去噪算法研究综述[J]. 工业控制计算机, 2010, 23(11): 73-74.

[4] Land E H. The Retinex theory of color vision[J]. Scientific American, 1977, 32: 108-128.

[5] 毕杨. 一种快速的曲波变换图像去噪算法[J]. 科技信息, 2009(16): 11-12.

[6] Kimmel R, Elad M, Shaked D, et al. A variational framework for Retinex [J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.

[7] 林笑君, 梁凤梅. 基于Retinex的一种图像去雾算法[J]. 电视技术, 2013, 37(17): 155-158.

[8] Candes E J, Donoho D L. Recovering edges in ill-posed inverse problems: optimality of curvelet frames [J]. Annals of Statistics, 2002, 30(3): 784-842.

[9] Candes E J, Demanet L, Donoho D L. et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Multiscale Modeling and Simulation, 2005, 5(3): 861-899.

[10] 谷秀平. 基于Curvelet变换的图像去噪和增强[D]. 天津: 天津理工大学, 2010.

[11] 颜兵, 王金鹤, 赵静. 基于均值滤波和小波变换的图像去噪技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(2): 51-53.

[12] 郭璠, 蔡自兴, 谢斌, 等. 图像去雾技术研究综述与展望[J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2417-2421.

[13] 李冠章, 罗武胜, 李沛. 一种高效地修正Retinex图像自适应对比度增强算法[J]. 测试技术学报, 2009, 23(5): 445-451.

[14] 马云飞, 何文章. 基于小波变换的雾天图像增强方法[J]. 计算法应用与软件, 2011, 28(2): 71-72.

[15] 占俊. 几种计算机数字图像处理技术的处理效果研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(21): 32-35.