

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.014

引用格式:陈清早,李想,余化鹏. 机场跑道图像去雾增强算法及其实现[J]. 电讯技术,2017,57(1):83-89. [CHEN Qingzao, LI Xiang, YU Huapeng. An airport runway images defogging algorithm and its implementation[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1):83-89.]

# 机场跑道图像去雾增强算法及其实现\*

陈清早<sup>1</sup>, 李 想<sup>2</sup>, 余化鹏<sup>\*\*2</sup>

(1. 电信科学技术第五研究所, 成都 610020; 2. 成都学院 信息科学与工程学院, 成都 610106)

**摘 要:**机场跑道场景下,由于雾、霾等恶劣天气以及大气散射的作用,使拍摄的图像对比度降低,颜色退化,物体特征难以辨认,影响机场跑道图像的异物检测与识别,带来一些安全隐患。针对上述问题,提出基于双线性插值和中值滤波的改进的引导滤波算法,提高图像对比度和处理速度,利于机场跑道异物检测与识别。仿真结果表明,改进的引导滤波算法与已有算法相比,处理速度提高了 2~3 倍,且图像彩色值分布更广,直方图更均匀。该算法拥有良好的边缘保持性,在细节增强方面有很好的指导意义。随后将改进的引导滤波算法移植到数字信号处理器(DSP)平台上,以满足实际工程应用对小型化的需求。

**关键词:**图像去雾;异物检测;双线性插值;中值滤波

**中图分类号:**TP391.9      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2017)01-0083-07

## An Airport Runway Images Defogging Algorithm and Its Implementation

CHEN Qingzao<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>, YU Huapeng<sup>2</sup>

(1. The Fifth Institute of Telecommunications Science and Technology, Chengdu 610020, China;

2. School of Information Science and Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Due to the atmospheric scattering, images obtained under bad weather conditions like fog and haze have low contrast, degraded color, and blurring object features. Low quality images directly affect the detection and recognition of foreign objects and debris, thus result in potential security risks. To solve above problems, the improved guided filtering based on the bilinear interpolation and median filtering is proposed. This method enhances the image contrast and improves processing speed, and it is beneficial for the detection and recognition of foreign object and debris. The simulation results show that the processing speed of the improved guided filtering algorithm is improved by 2~3 times compared with the existing algorithms, and the color distribution graph of the image is wider and the color histogram of the image is more uniform. The proposed algorithm has good edge preserving and good guidance in detail enhancement. Subsequently, the improved guided filtering is transplanted to digital signal processor(DSP) to meet the requirements of practical engineering applications.

**Key words:** image defogging; detection of foreign objects and debris; bilinear interpolation; median filtering

### 1 引 言

图像去雾作为图像处理的重要分支,在计算机

视觉领域具有重要的研究意义。在雾、霾等恶劣环境下拍摄的图像,受到大气散射作用的影响,导致图

\* 收稿日期:2016-05-09;修回日期:2016-07-12      Received date:2016-05-09;Revised date:2016-07-12

基金项目:四川省科技计划项目(2016RZ0070);四川省教育厅项目(15ZA0357)

\*\* 通信作者:musicfish1973@qq.com      Corresponding author:musicfish1973@qq.com

像对比度下降,给机场跑道异物检测<sup>[1]</sup>等工作造成不利影响,因此对雾天图像进行增强处理,提高图像质量具有十分重要的意义。对图像进行去雾处理的目的是提高图像的对比度和减少场景颜色偏移<sup>[2]</sup>。目前,图像去雾算法的研究主要是基于物理模型的方法,即图像复原的方法和非物理模型的方法,也即图像增强的方法<sup>[3]</sup>。本文主要针对非物理模型的方法,分析了 Tarel<sup>[3]</sup>在估计大气耗散时提到的中值滤波,但中值滤波不能很好地保持边缘,且不恰当的参数设置会引入 Halo 效应,并且该算法参数较多,不易调节。文献[4]在估计大气耗散函数时采用双边滤波来消除冗余细节。由于双边滤波处理速度较慢,文献[5]对软抠图算法进行改进时,引入引导滤波<sup>[6]</sup>,引导滤波采用局部线性模型,可以写出时间复杂度与窗口大小无关的算法,因此在使用大窗口处理图片时,其效率更高,但同时也增加了噪声。本文在已有的引导滤波的基础上,针对引导滤波处理图像引入噪声的问题和处理速度的问题,结合中值滤波和双线性插值原理,提出改进的引导滤波。

随着计算机视觉的发展,算法的应用对实时性和小型化要求越来越高,简单的算法仿真远远不能满足实际需要,因此,基于硬件平台实现算法应用越来越受到相关研究人员的重视。现阶段,主要基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)以及 FPGA+DSP 等平台,进行实时图像处理。本文将改进的引导滤波移植到 DSP 平台上,满足实际工程应用对小型化的需求,实现图像去雾算法的工程应用,为后期的图像处理研究奠定良好的基础。

## 2 算法原理

### 2.1 中值滤波

信号处理分为线性处理方法和非线性处理方法。中值滤波属于非线性的信号处理方法,它在一定条件下,可以克服由于线性滤波器处理图像时引起的细节模糊的问题。

中值滤波的基本思想是,把局部区域的像素按灰度等级进行排序,取该领域中灰度的中值作为当前像素的灰度值。

如图 1 所示,图像中任一点  $(x, y)$  进行  $m \times n$  掩模处理所得的响应为  $R$ ,实践中通常用如下简化形式表示:

$$R = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_{m \times n} z_{m \times n} = \sum_{i=1}^{m \times n} a_i z_i \quad (1)$$

式中: $a$  为掩膜系数, $z$  为与该系数对应的灰度值, $m, n$  为掩膜中包含的像素点的总数。

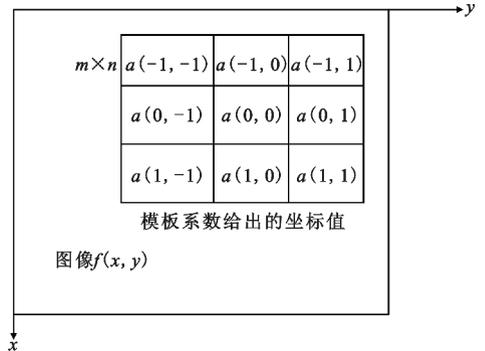


图 1 中值滤波机理

Fig. 1 Median filtering mechanism

### 2.2 引导滤波

引导滤波与双边滤波<sup>[7]</sup>具有相似性,也具有保持边缘的特性。引导滤波<sup>[6,8]</sup>的最大优势是采用了局部线性模型。该局部线性模型的核心思想是,某函数  $f(x)$  上一点  $(x)$  与其邻近部分  $([x - \sigma; x + \sigma])$  的点成线性关系,若函数比较复杂,则可以用很多局部的线性函数来表示。因此,当求该函数上某一点  $(x)$  的值时,只需计算所有包含  $(x)$  该点的线性函数的值并做平均即可。

假设引导滤波器在引导图像  $I$  和滤波输出  $q$  之间是一个局部线性模型,则有

$$q_i = a_k I_i + b_k \quad (2)$$

式中: $a_k$  与  $b_k$  是最终需要的线性系数,在现实意义上,它们分别代表图像的前景和背景颜色。

### 2.3 改进的引导滤波

根据引导滤波的理论基础可知,考虑到系数  $a$  和  $b$  直接影响引导滤波的处理效率,本文提出了采用双线性插值算法对系数  $a$  和  $b$  进行缩放改进,提高处理效率。

双线性插值<sup>[9]</sup>算法顾名思义就是在垂直与水平两个方向进行线性插值计算。

假设函数  $f(x)$  与函数上已知的 4 个点的值: $Q_{11} = (x_1, y_1)$ ,  $Q_{12} = (x_1, y_2)$ ,  $Q_{21} = (x_2, y_1)$ ,  $Q_{22} = (x_2, y_2)$ ,在函数  $f(x)$  上点  $p = (x, y)$ ,可通过线性插值近似求出。

首先,在  $x$  方向进行线性插值,得到

$$f(R_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}), \quad (3)$$

$$R_1 = (x, y_1), \quad (4)$$

$$f(R_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}), \quad (5)$$

$$R_2 = (x, y_2); \quad (6)$$

然后,在  $y$  方向进行线性插值,得到

$$f(P) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_2), \quad (7)$$

$$R_1 = (x, y_1), \quad (8)$$

$$R_2 = (x, y_2). \quad (9)$$

式中: $f(Q_{11})$   $f(Q_{21})$   $f(Q_{12})$   $f(Q_{22})$  分别代表输入像素在相邻 4 个子块中均衡后的直方图的灰度值,其系数分别表示输入像素点到相邻块的距离。

由公式(3)~(9)可以看出,利用双线性插值计算,求出一个输出像素的值只需要进行简单的乘法和加法运算即可,算法复杂度远远小于一个子块内进行的一次运算。这样,在引导滤波的过程中,就大大减少了运算量,提高了运算效率。

根据 2.2 节引导滤波的原理,求均值贯穿整个引导滤波过程,经过引导滤波处理后的图像  $f_d(x)$  相当于对图像进行了分块均值化,因此,  $f_d(x)$  是一副比较模糊的图像,失去了一些细节。根据图像本身的特点和基本的图像处理方法,通过实验,可采用公式(10)的线性组合方法,突出细节,实现增强效果。线性组合公式如下:

$$D = [S - f_d(x)] \times a + f_d(x) \times b. \quad (10)$$

式中: $D$  为增强后的图像; $S$  为原始图像; $a$ 、 $b$  为整数, $a$ 、 $b$  的值可以根据图像具体情况进行调整变动, $a$ 、 $b$  的值越大,则轮廓越清晰,但随着  $a$ 、 $b$  值的增大,会产生颜色失真。经过实验,控制  $a$  的值在 [4, 7] 之间, $b$  的值在 [1, 4] 之间。

由于引导滤波采用分块处理的方法,导致分块边缘像素不均匀现象,以及由公式(10)知,原图像  $S$  减去  $f_d(x)$  后乘以系数  $a$  的强化过程的影响,导致引入了椒盐噪声,由 2.1 节中值滤波的原理可知,它将每一像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内的所有像素点灰度值的中值,使拥有不同灰度的点看起来更接近它的领域值。因此,通过实验,在引导滤波的基础上加入了中值滤波,增强效果有了一定的改善。

### 3 算法对比

本实验在 Intel Core i5 双核处理器,4 GB 内存的计算机机上采用 Matlab 进行算法仿真,对几幅机

场跑道雾天图像进行对比性实验。

#### 3.1 仿真时间对比

由于 Matlab 自身仿真环境的影响,每次仿真时间都稍有偏差,在这里我们取 3 次仿真时间的平均值,具体仿真时间如表 1 所示。由表 1 可知,双边滤波用时最长,改进后的引导滤波用时最短,是中值滤波处理速度的 2~3 倍,是原引导滤波的 2 倍左右。

表 1 算法仿真时间对比

Tab. 1 Simulation time comparison among algorithms

算法	仿真时间/s	
	原图 1 (625 pixel×351 pixel)	原图 2 (899 pixel×512 pixel)
中值滤波	0.662 6	0.714 4
双边滤波	7.954 5	18.290 6
引导滤波	0.417 8	0.738 9
改进后的 引导滤波	0.245 8	0.392 4

#### 3.2 仿真结果分析

图 2 和图 3 分别为降质图像 1、降质图像 2 采用文献[6]提到的引导滤波、文献[7]提到的双边滤波、文献[8]提到的中值滤波以及本文提出的改进的引导滤波算法的仿真图。由仿真对比图可知,在雾天条件下,中值滤波没有很好的图像去雾增强效果;双边滤波较中值滤波有一定的改进,但同时引入了大量的噪声;引导滤波算法对于雾天图像有明显的增强效果,但也引入了一定的噪声;对于经改进的引导滤波处理后的图像,视觉效果较好,轮廓更平滑,达到了良好的图像去雾增强效果。



(a)原图1 (b)中值滤波 (c)双边滤波 (d)引导滤波 (e)本文算法

图 2 降质图像 1 处理结果

Fig. 2 Processing results of the degraded Image 1



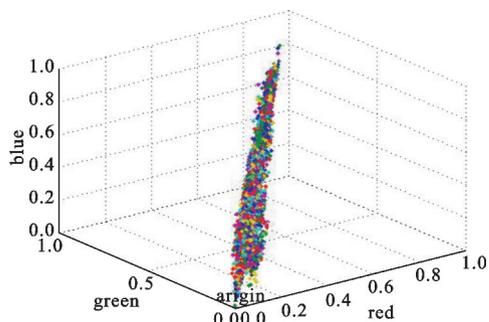
(a)原图2 (b)中值滤波 (c)双边滤波 (d)引导滤波 (e)本文算法

图 3 降质图像 2 处理结果

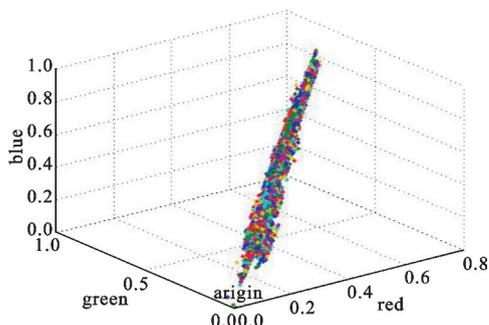
Fig. 3 Processing results of the degraded Image 2

以原图 1 为例,图 4 和图 5 分别为原图 1 的彩色值分布图和彩色直方图。对比文献[6]提到的引导滤波、文献[8]提到的中值滤波以及本文提出的改进的引导滤波算法的彩色值分布图和彩色直方图可知,原图 1、中值滤波处理后的图像和引导滤波处

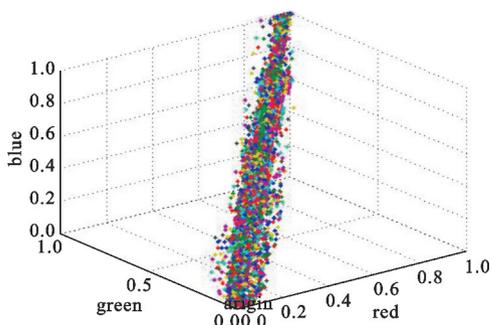
理后的彩色值分布较窄;直方图相对较集中,范围在  $[0, 200]$  之间。本文算法清晰化图像的彩色值分布较广;直方图较均匀,范围在  $[0, 255]$  之间。分析表明,改进后的算法能较好地改善图像的质量。



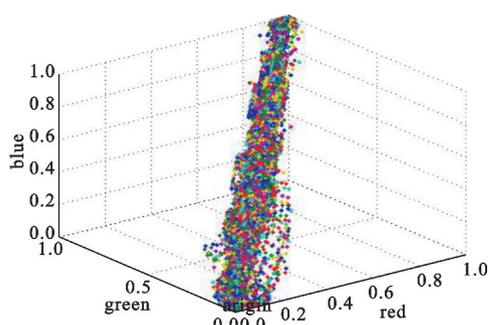
(a) 原图 1 的彩色值分布



(b) 中值滤波后的彩色值分布

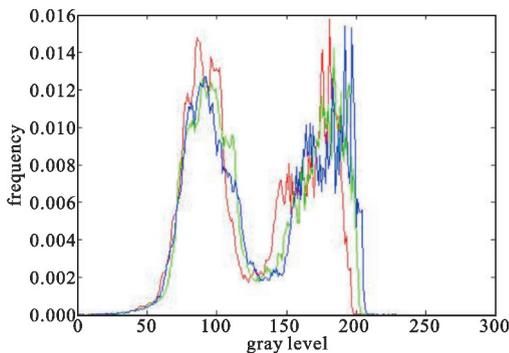


(c) 引导滤波后的彩色值分布

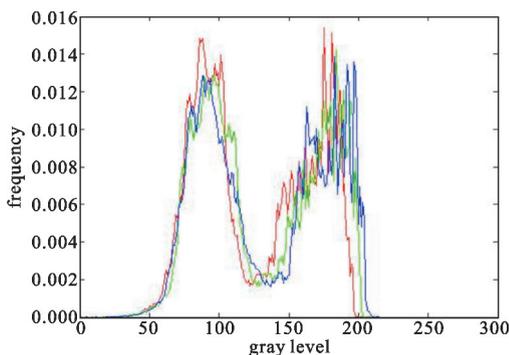


(d) 本文算法彩色值分布

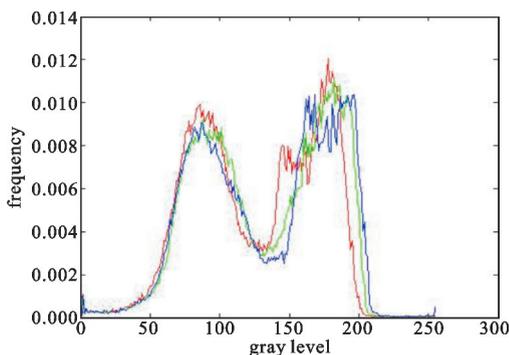
图 4 彩色分布图  
Fig. 4 The color distribution graph



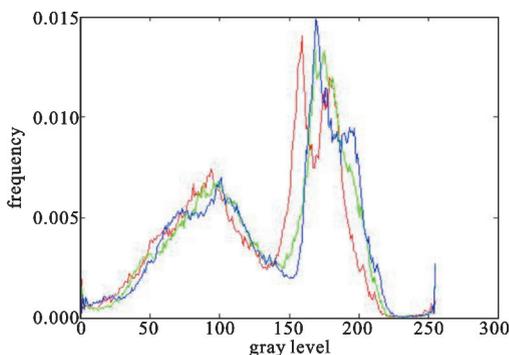
(a) 原图 1 的彩色直方图



(b) 中值滤波后的彩色直方图



(c) 引导滤波后的彩色直方图



(d) 本文算法彩色直方图

图 5 彩色直方图  
Fig. 5 The color histogram

由以上分析可以得出:改进后的引导滤波对于机场跑道雾天图像有很好的增强效果,且处理速度快。若考虑工程应用,软件仿真远远不够,因此,通过对硬件知识的学习,本文将改进的引导滤波算法移植到 DSP-TMS320C6748<sup>[10-11]</sup> 平台上,满足了实际工程应用小型化的需求。

## 4 DSP 硬件移植

本文采用的 DSP 处理器为 TMS320C6748,其主频为 456 MHz,核心板上采用 128 MB 工业级的闪存 (NAND FLASH),随机存取存储器 (Random Access Memory, RAM) 采用 128 MB 工业级的双倍速率同步动态随机存储器 (Double Data Rate, DDR)。TMS320C6748 处理器提供了完善的软件开发环境和系统支持,为算法移植奠定了良好的硬件基础。DSP 硬件平台上采用代码调试器 (Code Composer Studio, CCS) 调试程序。

### 4.1 OpenCV

开放源代码计算机视觉类库<sup>[12]</sup> (Open Source Computer Vision Library, OpenCV) 提供了许多视觉处理算法,具有开源性,是一个跨平台的计算机视觉库,并且具有很强的图像处理能力,对于进行硬件移植也有一定的优势。

现有的 OpenCV 版本有 1. x、2. x、3. x 等。随着版本的不断更新,功能也有所增加,如:最高版本 3. x 更加注重模块化,支持更多编程语言。

OpenCV 接口主要包括 C 接口和 C++ 接口,该库也有包含大量的 Python、Java 等接口。所有语言通过在线文档就可以获得应用程序编程接口 (Application Programming Interface, API) 函数。OpenCV 的代码经过适当改写可以正常运行在 DSP<sup>[13-14]</sup> 系统和单片机系统中,因此,在硬件移植过程中被广泛应用。

### 4.2 DSP 移植过程

经实验得出 Matlab 仿真算法直接移植到 DSP 过程比较复杂且效率差,因此本文考虑首先在 Visual Studio 平台上实现基于 OpenCV 的 C/C++ 仿真,再进行 DSP 移植。

本文基于 OpenCV 的 C 接口,采用 OpenCV 1.0 版本的封装库,移植流程如图 6 所示。

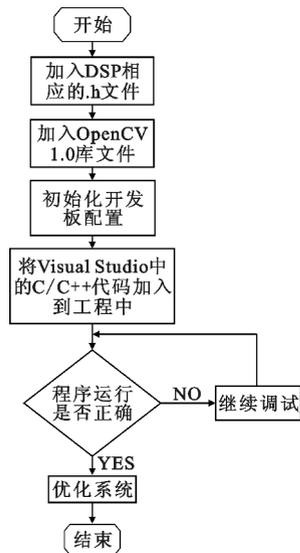


图 6 硬件移植流程图

Fig. 6 Flow chart of hardware transplanting

移植过程调用 CCS 中 OpenCV1.0 的函数时应注意,需将代码中的实参与 OpenCV1.0 函数中的形参相对应,其他参数依据 OpenCV1.0 函数中的形参,设置成与之匹配的默认值;在调试图片时,应注意图像分析器 (Image Analyzer) 中颜色字节数 (Pixel Stride (bytes)) 要根据图像本身的像素位数进行设置,本文设置为 4,若设置为其他值,则图像颜色显示异常;数据起始地址 (Start address) 应与图片起始地址一致;变量类型 (Read data as) 应与代码数据类型保持一致,本文采用 Char 类型。综上,图像参数设置应与硬件配置和代码参数完全保持一致,否则图像不能正常显示。

本文加载的程序算法,处理图片的 (分辨率为 625 pixel×351 pixel) 时间大约为 9.14 s,这个时间远远不能满足实际中工程的应用,所以后期优化是非常必要的。本文优化考虑的主要是将该代码的一些段放到 RAM 中,以加快中央处理器 (Central Processing Unit, CPU) 的访问速率,提升处理速率。若放在 DDR 中,则速度将较之减小 2 倍。

关键优化代码如下:

(1) C6748.cmd 文件里的优化

```

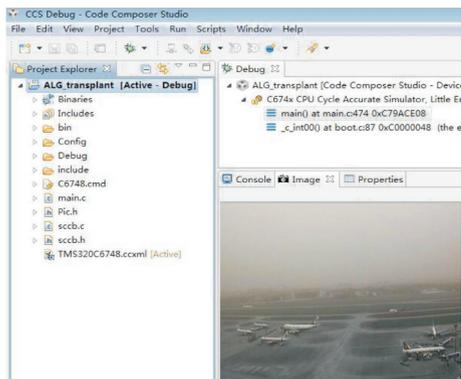
.stack >DSPL2RAM
.Cio >DSPL2RAM
.Switch >DSPL2RAM
.cinit >DSPL2RAM
.fardata >DSPL2RAM
.PRAM >DSPL2RAM
  
```

## (2) main 函数里的优化

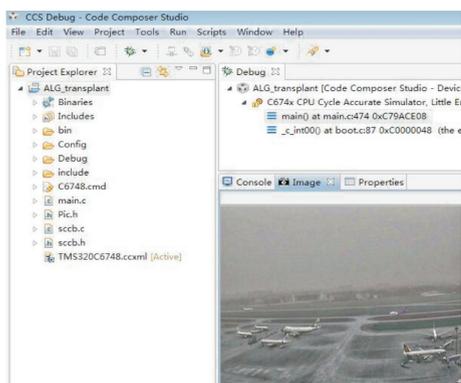
```
#pragma CODE_SECTION( Comb_IMG, ". PRAM" )
#pragma CODE_SECTION( cumsum, ". PRAM" )
#pragma CODE_SECTION( boxFilter, ". PRAM" )
#pragma CODE_SECTION( myGuidedFilter, ". PRAM" )
```

经过试验,优化后的处理时间大约为 3.07 s,处理速率提高约 3 倍。

以原图 1 作为实验图片,移植后的结果对比图如图 7 所示。



(a) 原图 1



(b) DSP 处理后的图像

图 7 硬件实现去雾处理

Fig. 7 Hardware implementation of defogging

由图 7 可知,通过本文硬件移植方法,实现了与软件算法仿真一致的增强效果,表明硬件移植成功。但由于硬件自身条件的限制,软件仿真的图像颜色与硬件处理后的图像颜色稍有不同,这也是后期需要研究改进的地方。

## 5 结束语

本文通过对已有算法原理的分析,对比了中值滤波、双边滤波和引导滤波,以及改进的引导滤波。

实验结果表明,经改进后的引导滤波算法,其仿真速度较已有算法提高了 2~3 倍,去除了已有算法处理图像后产生的部分噪声,使图像彩色值分布更广,直方图更均匀,图像轮廓更平滑,视觉效果更好,有利于机场跑道异物检测和识别。根据实际应用需要,通过 DSP 硬件平台实现算法移植,达到了图像增强的效果,为后期目标检测与识别奠定了良好的基础。但处理速度还未能满足实时性要求,后期将在算法和硬件配置基础上进一步进行优化,实现图像的实时处理。

## 参考文献:

- [1] 王洪,汪学刚. 机场跑道异物监测雷达关键技术[J]. 电讯技术,2011,51(2):7-10.  
WANG Hong, WANG Xuegang. Key technologies of radar for foreign objects debris detection on runways[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(2): 7-10. (in Chinese)
- [2] 宋晓敏,赵红东,卢俏,等. 雾霾天气下降质图像的清晰化处理[J]. 电讯技术,2016,56(2):208-211.  
SONG Xiaomin, ZHAO Hongdong, LU Qiao, et al. Clearness processing of haze-degraded image[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(2): 208-211. (in Chinese)
- [3] 吴迪,朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报,2015,41(2):221-239.  
WU Di, ZHU Qingsong. The latest research progress of image dehazing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221-239. (in Chinese)
- [4] 郭璠. 图像去雾方法和评价及其应用研究[D]. 长沙:中南大学,2012.  
GUO Pan. Research on image defogging effect assessment and application[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [5] HE K M, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [6] HE K M, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2010, 35(6): 1397-1409.
- [7] 孙抗,汪渤,周志强,等. 基于双边滤波的实时图像去雾技术研究[J]. 北京理工大学学报,2011,31(7):810-813.  
SUN Kang, WANG Bo, ZHOU Zhiqiang, et al. Real time image haze removal using bilateral filter[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(7): 810-813. (in Chinese)
- [8] 禹晶,徐东彬,廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报,2011,16(9):1561-1576.  
YU Jing, XU Dongbin, LIAO Qingmin. Image defogging: a

- survey[J]. Journal of Image and Graphics,2011,16(9): 1561-1576. (in Chinese)
- [9] GONZALEZ R C. 数字图像处理的 MATLAB 实现[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [10] 李凯. 基于 TMS320C6748 高速 DSP 信号处理模块设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.  
LI Kai. Design of a high performance signal processing module based on TMS320C6748 DSP[D]. Harbin; Harbin Engineering University,2013. (in Chinese)
- [11] 郭强,张斌. 基于 DMA 的 DSP-Cache 优化[J]. 电气电子教学学报,2013,42(9):2299-2304.  
GUO Qiang, ZHANG Bin. DSP - Cache optimization based on DMA [J]. Journal of Electrical & Electronic Education,2013,42(9):2299-2304. (in Chinese)
- [12] GARY B, ADRIAN K. Learning OpenCV[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2009:35-98.
- [13] 曹香鹏. 基于 DSP 的嵌入式图像处理平台的构建与应用[D]. 济南:山东大学,2010.

- CAO Xiangpeng. The construction and application of embedded image processing platform based on DSP[D]. Jinan; Shandong University. (in Chinese)
- [14] 汪安民,周慧,蔡湘平. TMS320C674X DSP 应用开发[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.

### 作者简介:



**陈清早**(1991—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与识别;  
Email:516098366@qq.com

**李 想**(1994—),男,四川眉山人,本科生,主要研究方向为图像处理与识别;

**余化鹏**(1973—),男,重庆人,博士,讲师,主要研究方向为图像处理与识别。

Email:musicfish1973@qq.com