文章编号 1674-2915(2009)05-0445-07

基于FPGA的近红外实时透雾成像方法

王德俊[1,2],王建立[1],阴玉梅[1],王鸣浩[1,2]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2.中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:针对雾天图像的退化现象,提出采用近红外波段成像和视频图像处理技术相结合的透雾成像方法。根据视频图像相邻两场直方图相似的特点,提出了用改进的直方图均衡化算法处理雾天降质图像。改进的算法简化了系统结构,降低了逻辑设计复杂度,节约了高速存储器部分硬件资源。算法经过MATLAB仿真验证,并在现场可编程门阵列(FPGA)视频图像处理平台上硬件实现。实验表明,改进算法在增强雾天图像的同时满足标准视频图像处理25 frame/s的实时性要求,结合近红外波段透雾能力使雾天图像能见距离提高1.5倍以上。

关 键 词:雾;近红外成像;直方图均衡化;现场可编程门阵列
中图分类号:TP391.4 **文献标识码**:A

Near infrared real-time penetrating fog imaging method based on FPGA

WANG De-jun[1,2], WANG Jian-li [1], YIN Yu-mei[1], WANG Ming-hao[1,2]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

Abstract: According to image degeneration on foggy days, a penetrating fog imaging method combining a near infrared imaging with a video image processing is proposed. On the basis of the characteristics of a low contrast image on foggy days and the high comparability of histogram of contiguous field in a video image, an improved histogram equalization algorithm is presented. Experiments indicate that this algorithm simplifies the system architecture, reduces the complexity of logical design, and saves the hardware resources of high speed memory. Moreover, it has been simulated and verified by a MATLAB and implemented on the video image processing platform based on Field Programming Gate Array(FPGA). The experiment results show that the near infrared wave band has a better penetrating ability on fog. The improved algorithm enhances the image quality on foggy days while meets the real-time requirement for currently a standard video image of 25 frame/s. With proposed method, the visible distance has been increased over 1.5 times on foggy days.

Key words: fog; near infrared imaging; histogram equalization; Field Programming Gate Array(FPGA)

收稿日期:2009-06-18;**修订日期**:2009-08-25

1 引 言

雾天自然光由于雾的遮蔽作用导致场景能见度下降,使高速公路和民航交通受阻,给国民经济造成不利影响。因此对实时透雾成像技术的研究具有重要现实意义,同时透雾成像技术也在海防等军事安全领域有广泛的应用[1]。

图像的透雾处理方法主要分为两类:一类是基于物理模型的图像复原方法,从物理成因角度将雾对大气的散射作用进行分析,根据点扩散函数建立雾天图像的退化模型,利用场景深度和雾浓度等先验知识复原雾天降质图像。其场景深度信息需利用多幅降质图像通过软件算法或雷达等测距设备得到,提高了软件算法复杂度和对硬件的要求,难以满足透雾成像技术的实时性和低成本要求[2,3]。另一类是根据雾天图像的低对比度特点,使用图像增强方法对雾天降质图像做清晰化处理。目前,透雾成像技术中应用的图像增强算法主要有 3 种:即直方图均衡化算法、Retinex 算法和使用小波变换对雾天图像进行增强的方法。国内学者对以上 3 种增强算法都进行了研究,但算法处理时间长且多停留在软件仿真阶段,同样不满足视频图像处理的实时性和低成本要求[4~6]。NASA 利用 Retinex 算法对雾等恶劣天气下图像进行处理并使用 TI 公司 TMS320C6711 浮点 DSP 芯片硬件实现了单尺度 Retinex 算法,取得了一定的效果。但由于 Retinex 算法复杂度的限制,只能采用降低视频图像帧频,减小图像尺寸等方法[7]。本文利用近红外波段(760 ~ 1 100 nm)的高透过率特性,在 CCD 摄像机前加近红外滤光片获得了雾天较可见光更高质量的图像,然后根据雾天降质图像的低对比度和视频图像相邻两场直方图相似的特点,提出改进的直方图均衡化算法并在 FPGA 视频图像处理平台上硬件实现,满足了当前标准视频信号(PAL、NTSC)的实时性要求。

2 改进直方图均衡化算法及其仿真验证

直方图均衡化是使用累积函数对灰度值进行调整,把原图像的直方图变换为均匀分布的形式,通过增加像素灰度值的动态范围达到提高图像整体对比度的效果。

对图像的空域增强通过函数 $t = EH(s)$ 完成,t、s 分别为目标图像和原图像在像素点(x,y)的灰度值,在均衡化处理时,增强函数 EH 需要满足两个条件:

增强函数 $EH(s)$ 在 $0 \leqslant s \leqslant L-1$ 的范围内是一个单调递增函数;

对 $0 \leqslant s \leqslant L-1$ 应有 $0 \leqslant EH(s) \leqslant L-1$。

第一个条件保证原图像各灰度级在增强处理后仍保持从黑到白(或从白到黑)排列次序,第二个条件保证增强处理后灰度值动态范围的一致性。

累计分布函数满足上述条件且能将 s 的分布转换为 t 的均匀分布[8]。

$p_r(r)$ 和 $p_s(s)$ 分别代表图像变换前后的概率密度函数,由基本概率理论可得到 $p_s(s)$ 的表达式为:

$$p_s(s) = p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right|, \tag{1}$$

由式(1)得到 $p_r(s)$ 中变量 s 表达式为:

$$s = T(r) \int_0^r p(w)\,d(w), \tag{2}$$

因此 $\left|\frac{ds}{dr}\right|$ 表达式为:

$$\left| \frac{ds}{dr} \right| = \frac{d}{dr}\left[\int_0^r p_r(w)\,dw \right], \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)得 $p_s(s) = 1$,由此可知 $p_s(s)$ 的结果始终服从均匀分布,与 $p_r(r)$ 的形式无关。

应用于数字图像处理时,数字图像的直方图表达式为:

$$p_s(s_k) = n_k/n$$
$$0 \leqslant s_k \leqslant 1;\ k = 0,1,\cdots,L-1, \tag{4}$$

式(4)中 $p_s(s_k)$ 代表原图像第 k 个灰度级出现的概率,n_k 代表相应灰度的像素个数,n 代表总的像素数。以 n_k 为自变量,$p_s(s_k)$ 为函数得到的曲线就是数字图像的直方图。具体公式为:

$$t_k = EH(s_k) = \sum_{j=1}^{k} n_j/j = \sum_{j=1}^{k} p_s(s_j)$$
$$0 \leqslant t_k,\ s_k \leqslant 1;\ k = 0,1,\cdots,L-1, \tag{5}$$

由式(5)可见,根据原图像直方图的统计规律可计算出均衡化后各像素的灰度值,完成对数字图像的直方图均衡化处理[9]。

2.2　算法的改进和仿真验证

由直方图均衡化算法原理可知算法实现分为图像的直方图统计、均衡化和映射 3 部分。视频图像处理时,在场正程期需完成直方图的统计并存储图像数据,场消隐期完成直方图均衡化。最后将存储的图像数据根据均衡化结果映射输出得到增强图像。因此目前图像处理系统均采用高性能处理器和高速存储器结合,使用存储器的乒乓操作完成视频图像直方图均衡化算法。由于高性能存储器和乒乓操作技术的使用提高了逻辑设计复杂度和系统成本,不满足视频图像处理的低成本要求。

根据视频图像相邻两场直方图的高度相似性特点对算法进行改进,在实现视频图像直方图均衡化算法时,将前一场图像直方图统计和均衡化结果作为当前场图像的映射数据输出。以上方法避免了外部存储器的频繁读写操作,简化了系统结构和逻辑设计的复杂度,节省了处理器和存储器存取数据时间,同时节约了视频图像处理系统存储器部分的硬件成本。改进算法的逻辑框图如图 1 所示。

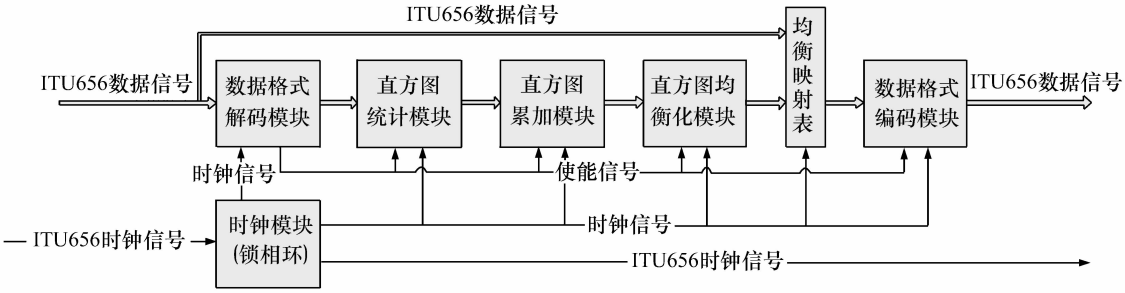
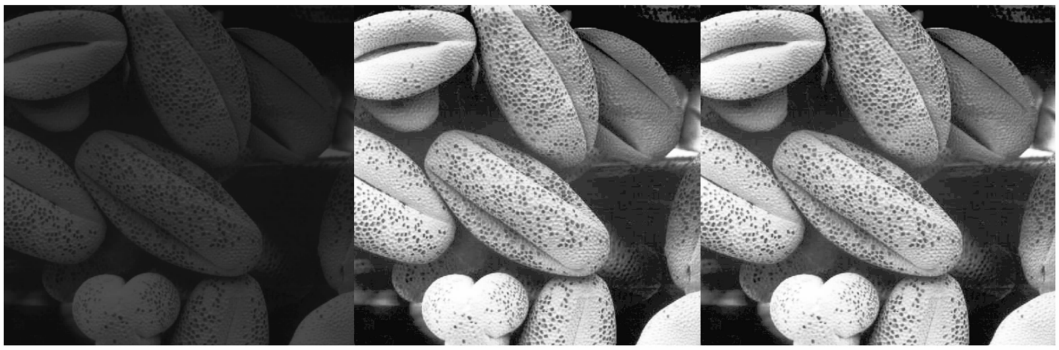


图 1　改进算法的逻辑框图

Fig. 1　Logical architecture of improved algorithm

改进算法使用 MATLAB 完成功能仿真。把一幅图像奇数行和偶数行数据分别作为视频图像的奇偶场图像,将奇场图像统计和均衡化结果作为偶场图像映射关系输出,偶场图像按相同方法处理后将均衡化后奇偶场数据合成新图像。实验表明,基于视频图像相邻两场图像直方图相似性改进的直方图均衡化算法与直接对图像进行直方图均衡化得到图像熵值分别为 5.602 和 5.585 bit,达到预期效果。使用 MATLAB 编程验证仿真结果如图 2 所示。



(a) 原图
(a) Original image

(b) 传统算法增强图像
(b) Enhancement image by traditional algorithm

(c) 改进算法增强图像
(c) Enhancement image by improved algorithm

图 2　算法的 MATLAB 仿真图对比

Fig. 2　Comparison of simulation images based on Matlab

3 直方图均衡化算法的FPGA硬件实现过程

3.1 改进算法针对FPGA实现的仿真优化

为满足视频图像处理的实时性要求并发挥FPGA在并行处理方面的优势,设计中对直方图均衡化算法采用以下优化措施。

首先使用FPGA内部存储器暂存图像数据中定时基准码和色差信号,避免了算法中使用定时器计数产生控制信号和从外部存储器频繁读取色差信号。PAL、NTSC等不同制式视频信号直方图均衡化的转换通过调节算法中除数(像素总数 n 值)实现。

在FPGA内使用VHDL语言编写直方图统计模块[10]。由于FPGA内实现浮点型数据运算相对复杂且消耗较多逻辑资源,在对图像进行直方图统计时将各灰度级像素点的个数作为直方图数据,尽量避免使用浮点型数据运算。对直方图统计结果进行均衡化处理,得到原灰度到均衡化后灰度映射关系表,显示时按照新的映射关系对原图像各像素点进行映射,根据以上思想对式(5)进行优化,得到式(6):

$$t'_k = \sum_{j=1}^{k} \frac{p_s(s_j) \times (L-1)}{n}$$

$$0 \leqslant t'_k \leqslant 1;\ k = 0,1,\cdots,L-1, \qquad (6)$$

式(6)中 t'_k 对应原灰度级为 k 的像素均衡化后的灰度值,$p_s(s_j)$ 代表原图像第 j 个灰度级出现的概率,L 为图像的灰度级数,n 为原图像中总像素数。以上操作使数据范围从[0~1]扩大到[0~$L-1$],避免了浮点数操作也保证了均衡化后灰度值的精度。算法中的乘法和除法运算可以利用FPGA中内嵌乘法器模块实现,提高运算速度并节约FPGA中的逻辑资源,使原来需要有多个DSP模块的Stratix型号FPGA完成的任务仅采用低成本的Cyclone II即能实现,进一步节约硬件成本。

实现直方图均衡化算法过程中,需要缓存直方图统计、累加数据及生成均衡映射表。可通过Altera的IP工具MegaWizard管理器调用Cyclone II内嵌的M4K RAM资源生成不同类型的存储器缓存直方图统计、累加和均衡映射表数据。利用MegaWizard管理器生成存储器时可灵活选择位宽、深度、读写使能、读写时钟等信号,简化了算法VHDL语言实现过程中存储器管理过程。

改进算法在Altera公司集成开发环境QuartusII5.1上利用Cyclone II内部集成锁相环和全局时钟网络及其提供的LPM基本宏功能模块完成仿真,使用VHDL硬件描述语言编写直方图均衡化算法各软件模块[11]。经以上优化后得到的仿真结果如图3所示,其中En为使能信号;Clk1、Clk2、Clk3为经锁相环输出数据处理需要的时钟信号;Vpo和Vdo为改进算法增强前后ITU-R BT.656格式图像数据流。

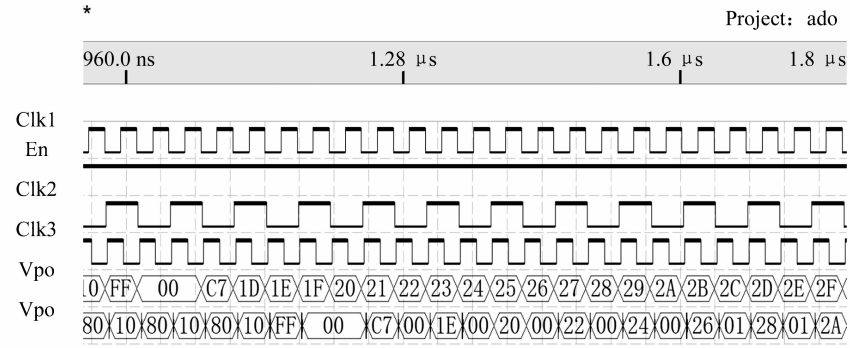


图3 改进算法在QuartusII 5.1的仿真图

Fig. 3 Simulational waveform of improved algorithm based on QuartusII 5.1 software

3.2 改进算法的FPGA硬件实现平台

硬件平台采用Altera公司Cyclone II低成本FPGA芯片EP2C5Q208C8作为核心处理器,将QuartusII 5.1软件中使用VHDL语言编写并通过

仿真验证的改进算法下载到 FPGA 硬件电路中,作为直方图均衡化算法模块。系统选择视频编解码芯片 SAA7113 和 SAA7121 完成模拟视频信号和数字视频信号之间的转换[12],CCD 摄像机和监视器作为视频输入输出设备。硬件系统组成如图 4所示。

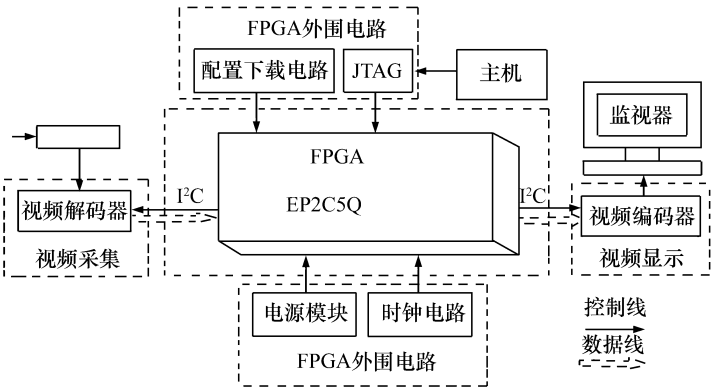


图 4　基于 FPGA 的图像处理平台

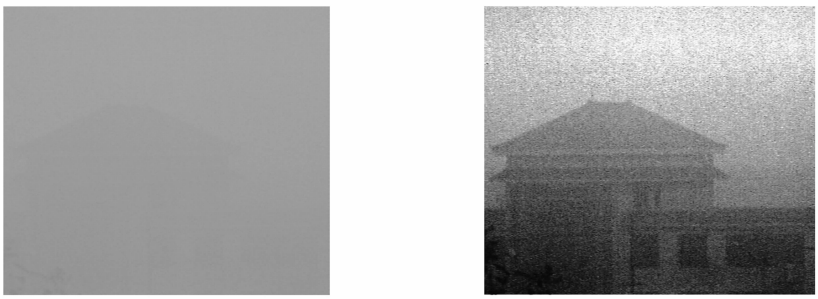
Fig. 4　Image processing system based on FPGA

其中模拟视频信号经视频编码芯片 SAA7113 转换成 ITU-R BT. 656 格式数字视频信号输入 FPGA。SAA7121 将 FPGA 内直方图均衡化模块处理后的 ITU-R BT. 656 格式数字视频信号转换成 PAL、NTSC、SECAM 制模拟视频信号。视频编码芯片所需 27 MHz 时钟由 FPGA 内部锁相环调节相位至与 8 位数字视频信号同步后输出。使用 I^2C 接口配置寄存器完成 SAA7113 和 SAA7121 输出亮度、色差等信号的控制。

FPGA 外围电路由电源电路、时钟电路、复位电路、配置下载电路、JTAG 控制和调试电路等几部分组成。FPGA 的配置下载使用 JTAG 和 AS 模式,JTAG 模式用于 FPGA 视频图像处理的在线调试,AS 模式使用配置芯片在上电时完成自动加载,AS 模式可脱离 PC 机独立工作满足工程实际要求。

4　实验结果与分析

采用可见光和近红外双波段采集雾天视频图像,在基于 FPGA 的图像处理平台上对拍摄的图像进行实时处理。得到雾天可见光图像及 FPGA 实时增强图像如图 5 所示,雾天近红外图像及 FPGA实时增强图像如图 6 所示(右图为 2008 年 11 月 13 日 CCD 摄像机拍摄的长春市雾天某建筑物图像,当天能见度为 0. 8 km)。



(a) 原图
(a) Original image

(b) 增强图像
(b) Image after enhancement

图 5　雾天可见光图像及 FPGA 实时增强图像

Fig. 5　Visible light image and real-time enhancement image based on FPGA in fog

(a) 原图
(a) Original image

(b) 增强图像
(b) Image after enhancement

图6 雾天近红外图像及FPGA实时增强图像

Fig. 6 Infrared image and real-time enhancement image based on FPGA in fog

对雾天拍摄的可见光和近红外图像及其各自在FPGA硬件平台上使用直方图均衡化算法增强图像的均值和熵的参数进行分析,结果如表1所示。

表1 各图像统计分析

Tab. 1 Statistic analysis of images

图像	均值(256灰度级)	熵(bit)
可见光图像	153.200 7	4.172 9
可见光增强图像	131.270 0	7.821 4
近红外图像	153.621 9	4.249 1
近红外增强图像	138.128 9	7.842 3

通过对比图5(a)和图6(a)可见光和近红外两个波段采集的图像及分析表1的数据可知,雾天拍摄的红外图像熵值高于可见光图像,图6(a)中能够辨认出建筑物的窗户,证明近红外波段具有更好的透雾能力。对比图5和图6原图像和FPGA硬件实时增强的图像及分析表1的数据可知基于FPGA的改进直方图均衡化算法得到的图像的熵值提高超过80%,增强图像的动态范围和对比度明显提高。

5 结 论

本文首先在CCD探测器前加滤光装置,采集到可见光和近红外两个波段的雾天图像,通过对比验证了近红外波段具有更好的透雾能力。比较了当前国内外图像透雾处理算法,利用视频图像相邻两场直方图的高度相似性改进直方图均衡化算法并在FPGA图像处理平台上硬件实现,验证了MATLAB前期仿真结果。实验结果表明,改进算法简化了系统结构和逻辑设计的复杂度,节省了处理器和存储器存取数据时间和传统增强算法中SRAM等高速存储器部分电路,节约了30%的硬件成本。文中提出了采用近红外光电探测技术和基于FPGA的实时图像改进直方图均衡化算法处理雾天图像使雾天图像能见距离提高1.5倍以上,同时满足视频图像处理的实时性和低成本要求。

参考文献:

[1] Al NABOULSI M C, SIZUN H, de FORNEL F. Wavelength selection for the free space optical telecommunication technology[J]. *SPIE*, 2004, 5465: 168-179.

[2] 翟艺书,柳晓鸣,涂雅瑗,等. 一种改进的雾天降质图像的清晰化算法[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(3): 55-58.
ZHAI Y SH, LIU X M, TU Y Y, *et al*.. An improved fog-degraded image clearness algorithm[J]. *J. Dalian Maritime University*, 2007, 33(3): 55-58. (in Chinese)

[3] 芮义斌,李鹏,孙锦涛. 一种图像去薄雾方法[J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 154-156.
RUI Y B, LI P, SUN J T. Method of removing fog effect from images[J]. *Computer Appl.*, 2006, 26(1): 154-156. (in

Chinese)

[4] 詹翔,周焰. 一种基于局部方差的雾天图像增强方法[J]. 计算机应用,2007,27(2):510-512.
ZHAN X,ZHOU Y. Algorithm based on local variance to enhance contrast of fog-degraded image[J]. *Computer Appl.*, 2007,27(2):510-512. (in Chinese)

[5] 王彦臣,李树杰,黄廉卿. 基于多尺度 Retinex 的数字 X 光图像增强方法研究[J]. 光学 精密工程,2006,14(1):70-76.
WANG Y CH,LI SH J,HUANG L Q. Enhancement of radiography based multiscale Retinex[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):70-76. (in Chinese)

[6] ZHU X F,WU F,TAO CH K. A new method of remote sensing image recovery based on WWC[J]. *SPIE*,7156:71561.

[7] HINES G D,RAHMAN Z-D,JOBSON D J,*et al*.. DSP Implementation of the Retinex image enhancement algorithm[J]. *SPIE*,2004,5438:14-24.

[8] 章毓晋. 图像工程(上册)图像处理[M],2 版. 北京:清华大学出版社,2006:90-93.
ZHANG Y J. *Image Engineering*(*I*) *Image Processing*[M],2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press,2006:90-93. (in Chinese)

[9] 王旭东,贺明,王新赛. 采用的红外图像实时直方图双向均衡设计[J]. 电子技术,2007,5:33-35.
WANG X D,HE M,WANG X S. [J]. *Electronic Technology*,2007,5:33-35. (in Chinese)

[10] 秦连城,冯其云,张 旭,等. 交流电机控制系统的 FPGA 接口设计[J]. 光学 精密工程,2008,16(5):931-936.
QIN L CH,FENG Q Y,ZHANG X,*et al*.. Design of interface in asynchronous motor control system based on FPGA[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(5):931-936. (in Chinese)

[11] 陈小冬,林泽祥,黄自力,等. FPGA 有限状态机模拟 I^2C 总线设计[J]. 中国测试技术,2007,33(1):105-107.
CHEN X D,LIN Z X,HUANG Z L,*et al*,. Design of FSM simulation for I^2C bus based on FPGA[J]. *China Measurement Technology*,2007,33(1):105-107. (in Chinese)

[12] 吴继华,王诚. Altera FPGA/CPLD 设计(高级篇)[M]. 北京:人民邮电出版社,2005:119-139.
WU J H,WANG CH. *Altera FPGA/CPLD Design*(*Senior Section*)[M]. Beijing:Posts & Telecom Press,2005:119-139. (in Chinese)

作者简介:王德俊(1984—),男,吉林安图人,硕士研究生,主要从事透雾成像技术研究。E-mail:252371788@163.com