

文章编号 1004-924X(2009)10-2612-08

红外图像实时显示增强系统设计

吴家伟^{1,2}, 武春风², 庾文波²

(1 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191;

2 湖北航天技术研究院 总体设计所, 湖北 武汉 430034)

摘要:为了解决红外实时图像处理系统中热像仪输出动态范围大和监视器显示输出动态范围小之间的矛盾,满足信息处理系统大数据量和高实时性的要求,设计了一种新的基于现场可编程门阵列(FPGA)实现的红外实时图像增强算法。首先采用均值滤波的思想统计图像的局部极值,然后使用多级均值法计算图像灰度变换区间分界点,最后对图像做分段线性灰度变换,整个算法通过FPGA实现。实验结果表明,该方法不仅解决了非制冷红外焦平面阵列探测器输出值随其工作时间变化的问题,而且消除了图像中探测器盲元的干扰,丰富了图像背景细节,增强了图像显示效果。与直方图变换等传统图像增强算法相比,该算法计算时间缩短了1.38 ms,占用存储资源减少了97.6%。在工程应用上,该方案简单可靠,成本较低,易于FPGA实现,可为其他红外实时图像处理系统的设计提供参考。

关键词:红外图像;局部极值;多级均值;线性变换;图像增强;实时处理

中图分类号:TP391.4;TN216 **文献标识码:**A

Design of real-time infrared image enhancing system

WU Jia-wei^{1,2}, WU Chun-feng², TUO Wen-bo²

(1. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Designing Institute of Hubei Space Technology Academy, Wuhan 430034, China)

Abstract: There is a contradiction between the 14 bits output data of an infrared thermal imager and the 8 bits input data of its monitor in a real-time infrared image processing system. A novel algorithm for real-time infrared image enhancement based on Field Programmable Gate Array(FPGA) is proposed not only to solve this problem but also to satisfy the real-time and mass data needs of the system. Firstly, an image mean filter is used to compute the local limit values for each frame dynamically. Secondly, a multi-level average statistics method is designed to calculate the values of segment points for each gray normalization partition. Finally, the mean of different linear normalizations on different gray level segments is calculated to enhance the infrared image. The whole algorithm is developed on FPGA hardware with Verilog language. Experimental results show that this algorithm resolves the problem that the output values of an un-cooled focal plane array detector vary with its working life. Moreover, the algorithm reduces the impact from bad pixels, and enhances the detail of an image that has objects at both high and low temperatures in a scene. Compared with histogram projection, one of

收稿日期:2009-02-23;修订日期:2009-05-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60736010)

the most traditional image enhancement methods, this algorithm shortens the computation time by about 1.38 ms and the memory resource reduces by 97.6%. It can be implemented more easily by FPGA and performed better in a real-time infrared image enhancement system. In terms of engineering applications, the proposed scheme with simple architecture, high reliability and low cost characters can provide a valuable reference for future designs of real-time infrared image processing systems.

Key words: infrared image; local limit value; multi-level average; linear normalization; image enhancement; real-time processing

1 引言

图像处理作为一种重要的信息技术,已经在航空航天、遥感遥测、生物医学、军事通信、信息安全等领域得到广泛的应用^[1]。多领域的应用需求产生了巨大的市场空间,但也对图像处理系统的实时性和准确性提出了更高的要求。实时图像处理一般采用数字信号处理器(DSP)或可编程逻辑门阵列(FPGA)实现。航天领域图像信息数据量大,且实时性高,如用单 DSP 处理,即使是高性能的 DSP 也很难满足要求。而 FPGA 器件各功能模块可以同时工作,实现了指令级、比特级、流水级甚至是任务级的并行执行,从而大大加快了计算速度。在图像处理系统中,底层的信号预处理算法处理的数据量很大,对处理速度要求很高,但算法结构相对简单,适于用 FPGA 实现。高层处理算法处理的数据量较少,但算法控制结构复杂,适于用 DSP 实现。

红外图像是场景热辐射分布的成像。由于场景中的目标与背景的温差相对较小,所以红外图像具有高背景、低反差的特点,其信噪比也较可见光图像的低。为了能够从红外图像中正确地识别出目标,必须对红外图像进行对比度增强处理^[2-7]。基于直方图统计的灰度变换是经典的图像增强方法^[8-10]。但是,对于 FPGA 硬件系统,直方图统计运算量大,也需要较大的 RAM 资源存放直方图信息,尤其是原始图像的灰度动态范围较大时,需要的 RAM 资源也随之增多,因而不利于 FPGA 逻辑的直接实现。本文提出一种新的基于图像局部极值的多级均值分段线性灰度变换增强算法,充分结合目标特性,能在较少逻辑资源

和存储资源开销的情况下,获得接近于直方图统计灰度变换法的图像增强效果。

2 图像增强系统的构成及其工作原理

2.1 红外实时图像增强系统的硬件构成

图 1 红外实时图像增强系统的系统框图。该系统前端使用串行 LVDS 协议接收来自红外热像仪的序列图像数据,后端处理部分采用 FPGA (ALTERA 公司的 Cyclone 系列 FPGA EP1C20F324)负责图像接收、发送控制和显示增强处理算法,采用 DSP (TI 公司的 TMS320C6000 系列 DSP C6414)实现图像压缩、目标检测、识别、跟踪等算法。

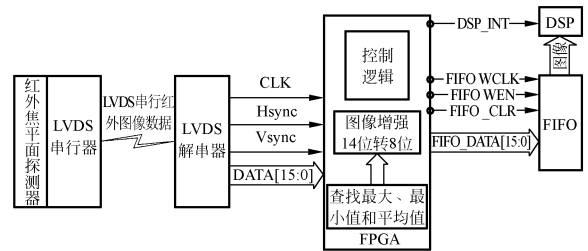


图 1 红外实时图像增强系统框图

Fig. 1 Block diagram of real-time infrared image enhancement system

2.2 红外实时图像增强系统的工作原理

输入图像为 320×240 的 14 bit 红外数字图像,帧频为 50 fps,输出码流速率 ≤ 2 Mb/s。由于系统要求较高的实时性和较窄的通信带宽,必须将 14 bit 图像数据变换为 8 bit 图像数据后再进行压缩、传输及其他处理。系统原本使用 DSP 进行图像灰度变换,由于 DSP 的实时性有限,无法对每帧图像都统计量化区间,因此采取固定区间

的一段线性变换。但是非制冷红外焦平面阵列探测器输出值会随其工作时间产生漂移,造成图像数据溢出量化区间,图像质量骤然下降,无法满足系统设计的要求。

另外,考虑到其他复杂算法占据了 DSP 大部分资源,用 DSP 实现图像增强算法不仅实时性达不到要求,还会占用其他算法的资源,影响它们的有效性。因此,本系统选择 FPGA 来实现图像实时增强算法。红外焦平面探测器输出的图像通过 LVDS 串行器转换成串行数据,图像增强系统接收端通过 LVDS 解串器获取到并行的图像数据, FPGA 实时接收,并做 14 bit 转 8 bit 图像增强,然后写入 FIFO,并在适当时候给出 DSP 中断信号一次, DSP 收到中断信号后,将 FIFO 中的图像取走,做压缩及其他处理。

3 图像增强系统软件的关键算法

图像增强从信息论的角度来看,也就是增加了信源熵,如公式(1)所示。其中 P_i 为第 i 级灰度级的概率。从使用者的角度来看,也就是增加了从视场中获得的信息量。本文算法的主要目的是将 14 bit 图像数据变换为 8 bit 图像数据以后,图像中目标仍能正常捕获,背景细节依然明显。核心思想是在连续两帧图像变化不大的假设下,采用基于图像局部极值的多级均值分段线性灰度变换算法对热像仪输出的原始图像数据进行处理,整个算法采用 FPGA 实现,具有较高的实时性和可靠性。

$$E = \sum_{i=0}^{255} -P_i \cdot \log(P_i) . \quad (1)$$

3.1 红外热像仪输出动态范围

对红外热像仪在不同环境温度下(30~60℃)的输出动态范围进行统计,如表 1 所示。当目标温度恒定时,热像仪的环境温度和工作时间对其输出值都有影响。从表中可以看出,目标温度为 30~70℃时,热像仪输出值分布在 28 000~40 000。

另外,目标温度为 0℃时热像仪输出值约为 25 000,目标温度为 90℃时热像仪输出值约为 48 000(表 1 中未列出)。

表 1 红外热像仪输出动态范围

Tab.1 Output values of infrared thermal imager

不同工作时间热 环境温 度——目标温度	像仪输出		
	刚开机	开机 1 小时后	开机 2 小时后
30~30℃	28 253	30 112	29 738
30~50℃	31 017	33 564	33 096
30~70℃	39 835	40 390	40 171
40~30℃	28 669	30 543	30 675
40~50℃	31 920	32 655	32 127
40~70℃	38 654	39 981	38 743
50~30℃	28 436	29 182	29 468
50~50℃	31 975	33 274	32 994
50~70℃	38 166	39 852	39 529
60~30℃	28 310	29 956	28 787
60~50℃	31 812	32 927	32 570
60~70℃	38 862	40 116	40 103

3.2 线性灰度变换

假设原图像 $f(x, y)$ 灰度分布范围 $[\min, \max]$, 变换后的图像 $g(x, y)$ 灰度分布范围 $[0, 255]$, 则传统的一段线性灰度变换为:

$$g(x, y) = \frac{(f(x, y) - \min) \times 255}{\max - \min} . \quad (2)$$

直接统计图像灰度的最小值作为 \min , 图像灰度的最大值作为 \max , 再利用公式(2)对图像进行线性变换。这种方法只需要比较器就能获取 \min 和 \max , 硬件很容易实现。然而,这种方法依赖于图像灰度的最大值和最小值,而噪声通常也容易出现在最值点上,出现在最值点上的单个噪声点就可以严重影响该算法的效果,尤其是对于焦平面校正后还存在过热象元或死象元的情况,这种增强算法就无法工作。而且图像的最大值和最小值随时间具有较大的起伏,不具有时间上的稳定性,变换后的图像容易出现闪烁的情况。如果能够统计出图像的直方图信息,就可以根据需要选取直方图两端一定百分比处(假设噪声像素数不超过图像像素数的 1%)的灰度级作为线性变换的 \min 和 \max 。但是,对于硬件系统,直方图统计运算量大,也需要较大的 RAM 资源存放直方图信息,尤其是原始图像的灰度动态范围较大时,需要的 RAM 资源也随之增多,因而不利于 FPGA 逻辑的直接实现。

本文采用均值滤波的思想统计图像局部极值,从而计算图像的 \min 和 \max 。具体步骤是先将图像划分为若干子块,然后求出每个子块的灰

度平均值,最后从这些平均值中取最大最小值作为该图像的最大最小值。假设有一幅 $M \times N$ 个像素的图像 $f(x, y)$, 将其分割成 $k \times k$ 大小的子块, 则每个子块的灰度平均值为:

$$avg_i = \frac{1}{k \times k} \sum_{(m,n) \in S_i} f(m, n), \quad (3)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, \frac{M \times N}{k \times k}$, i 表示子块的序列号, S_i 表示第 i 个子块中点的坐标的集合, $M = 320, N$

$= 240$ 。在一定程度上, 可以认为就是将分辨率为 $M \times N$ 的原图分块求均值后得到分辨率为 $\frac{M}{k} \times \frac{N}{k}$ 的新图。取 $k = 4, 8, 16$ 进行实验, 并与直方图统计结果对比, 如表 2 所示(由于篇幅限制, 仅列出部分代表性数据)。从表 2 中可以看出, 基于均值滤波的局部极值统计法得到的结果与直方图统计法得到的都比较接近, 尤其是当时最为接近。

表 2 局部极值法和直方图统计法得到的图像最大最小值

Tab. 2 Max and min values computed by local limit statistics and histogram statistics

不同大小分块 与直方图 环境温度 ——目标温度	k=4		k=8		k=16		直方图	
	统计	最大值/最小值	统计	最大值/最小值	统计	最大值/最小值	统计	最大值/最小值
30~30 °C		27 579 / 25 743		27 460 / 25 770		27 523 / 25 836		27 382 / 25 776
30~50 °C		31 126 / 25 787		31 090 / 25 798		30 076 / 25 833		31 064 / 25 795
30~70 °C		40 112 / 25 995		40 071 / 25 936		40 152 / 25 997		39 998 / 25 936
40~30 °C		28 701 / 27 194		28 682 / 27 194		28 714 / 27 163		28 681 / 27 181
40~50 °C		32 768 / 26 497		32 733 / 26 534		32 739 / 26 570		32 714 / 26 531
40~70 °C		38 922 / 26 473		38 854 / 26 502		38 871 / 26 537		38 803 / 26 490
50~30 °C		27 624 / 26 151		27 536 / 26 114		27 494 / 26 201		27 434 / 26 103
50~50 °C		31 142 / 25 847		31 044 / 25 837		31 115 / 25 843		31 022 / 25 827
50~70 °C		37 572 / 25 798		37 535 / 25 841		37 569 / 25 882		37 526 / 25 836
60~30 °C		28 379 / 26 982		28 345 / 26 989		28 402 / 27 065		28 331 / 26 974
60~50 °C		31 915 / 26 370		31 871 / 26 368		31 922 / 26 377		31 852 / 26 355
60~70 °C		37 081 / 26 055		36 986 / 25 958		36 944 / 26 013		36 976 / 25 945

3.3 分段线性灰度变换

根据系统工作环境和目标特性分析, 为了解决红外热像仪 25 000~48 000 的大动态范围与图像处理系统 0~255 的小动态范围之间的矛盾, 简单的一段线性灰度变换显然不能满足要求, 必须采用分段线性灰度变换算法。分段线性灰度变换的关键在于选取合适的分界点和恰当的归一化单位。本文采用图 2 所示的变换曲线进行分段线性变换。

则对应的变换公式为:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & 0 \leq f(x, y) < \min \\ \frac{(f(x, y) - \min) \times g_1}{f_1 - \min} & \min \leq f(x, y) < f_1 \\ \frac{(f(x, y) - f_1) \times (255 - g_1)}{\max - f_1} & f_1 \leq f(x, y) < \max \\ 255 & f(x, y) \geq \max \end{cases}, \quad (4)$$

依次对应 $0 \leq f(x, y) < \min, \min \leq f(x, y) < f_1, f_1 \leq f(x, y) < \max, f(x, y) \geq \max$ 四个分段。式

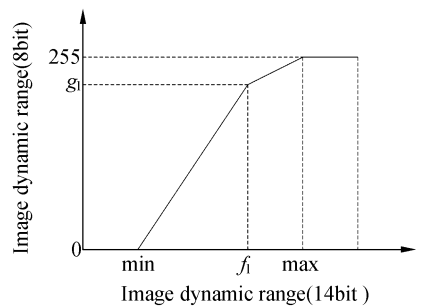


图 2 灰度分段线性变换曲线

Fig. 2 Different linear normalizations on each gray level segment

中 \min 和 \max 可由前面提出的局部极值统计法计算得到。分界点 f_1 可由直方图统计得到。直方图需要统计每个灰度级的像素个数, 但是对于中间有限范围内的灰度级及其像素个数的详细信息对于计算 f_1 基本上没有帮助, 而直方图统计的大部分运算时间和存储空间却消耗在这些地方。

因此,本文采用多级均值的方法来近似计算 f_1 的值,如图 3 所示。首先计算出图像灰度的均值,然

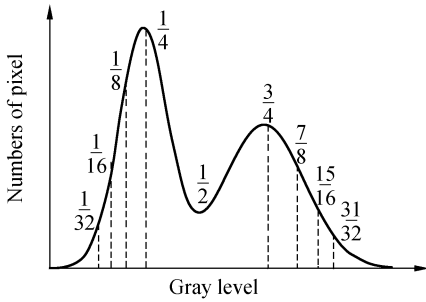


图 3 多级均值统计法

Fig. 3 Schematic diagram of multi-level average statistics

后再根据所获取的均值(1/2 处均值),计算出图像灰度级小于均值处的均值和图像灰度级大于均值处的均值,即 1/4 和 3/4 处的均值,同理可算出 1/8 和 7/8 处的均值,理论上可以算出任何 $1/2^n$ 和 $(2^n - 1)/2^n$ 处的均值。 $I_{1/2^n}$ 和 $I_{(2^n - 1)/2^n}$ 分别表示 $1/2^n$ 和 $(2^n - 1)/2^n$ 处的均值。

$$a = I_{1/2^n}, \tag{5}$$

$$b = I_{(2^n - 1)/2^n}. \tag{6}$$

根据系统应用环境,红外热像仪视场内大部

分场景温度分布在 30~70 °C 之间,且高温(70~90 °C)物体在图像中所占像素比例不大于 12%。取 $n=3$,即 f_1 对应图像 7/8 处的均值,实验结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,多级均值统计法的计算结果与直方图统计法的结果相当接近,但前者用 FPGA 实现起来比较容易,占用资源较少,实时性较高。

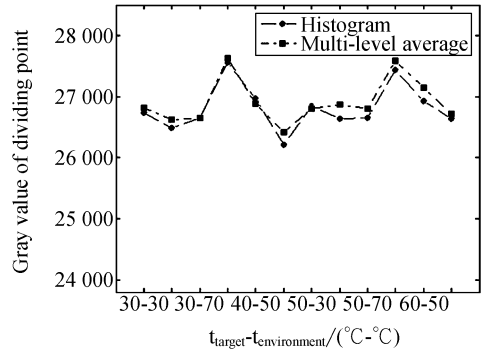


图 4 多级均值统计与直方图统计结果比较

Fig. 4 Comparison of multi-level average statistics and histogram statistics

3.4 FPGA 设计与实现

基于 FPGA 的红外实时图像增强系统硬件结构如图 5 所示。图像发送、接收 FIFO 在 FPGA

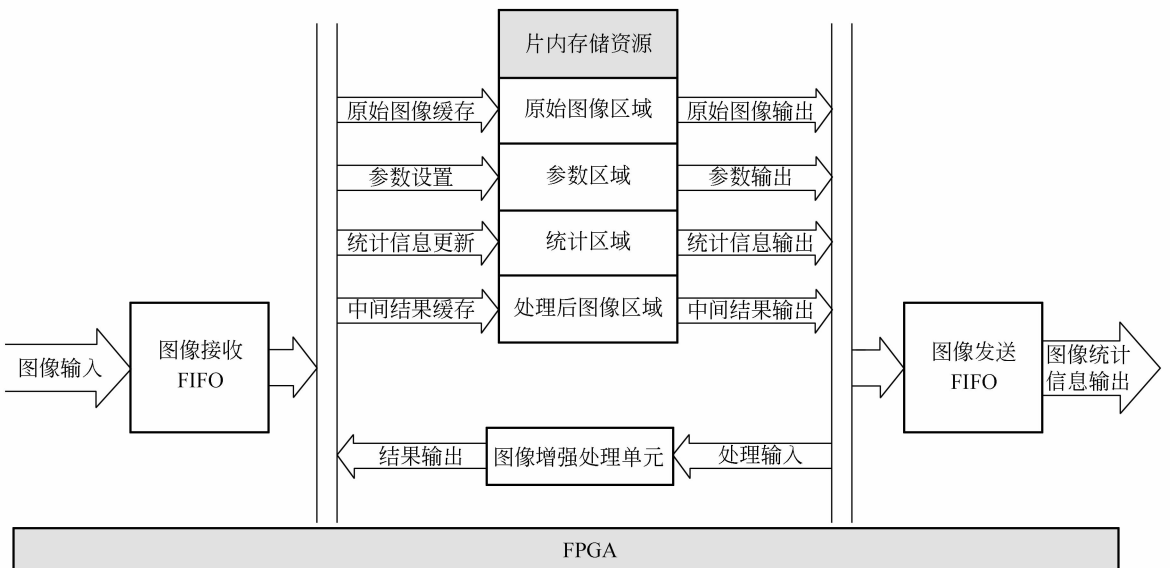


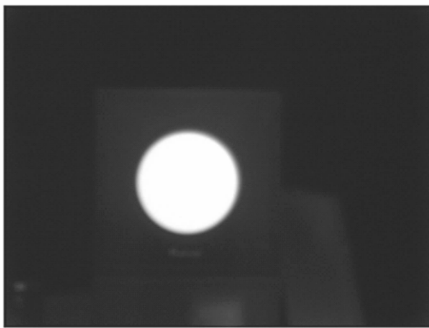
图 5 基于 FPGA 的红外实时图像增强系统硬件结构

Fig. 5 Hardware structure of real-time infrared image enhancement system based on FPGA

内实现。系统核心是图像预处理单元,其利用 FPGA 内部存储资源,高效率地实现图像的显示增强处理。参数区域用于算法参数的存储,供算法使用并随时更新。统计区域用于对图像统计信息(例如帧号,平均值,多级均值等)的存储,若运算有需求,可以被随时调出使用。原始图像区域用于缓存输入的原始图像数据,可以是单帧,亦可是多帧图像。处理后图像区域用于存储中间计算结果和最终计算结果,并可被随时调出使用。实现该方案系统需要满足图像帧消隐的时间大于增强处理算法需求时间。

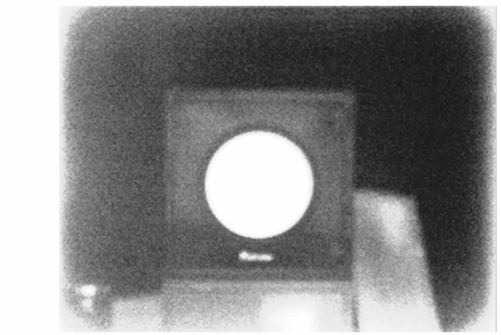
4 实验结果

为了检验本文算法的有效性,将其与传统的一段线性变换算法和直方图统计分段线性变换算法进行了对比。图 6 给出了采用三种不同算法显示增强后的图像及其对应的直方图。图 6 中热像



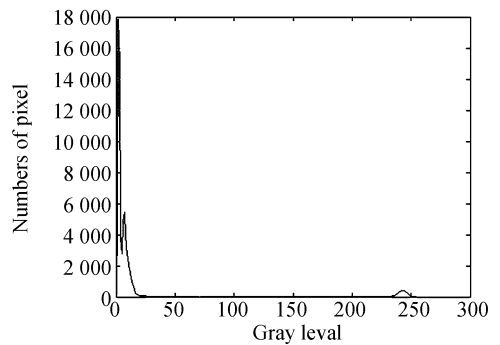
(a) 一段线性变换图像

(a) Uniform linear normalization on whole gray level



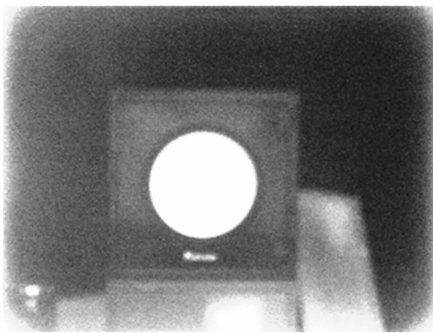
(c) 基于局部均值的多级均值分段线性变换图像

(c) Different linear normalizations on different segments using multi-level averages based on local limit values



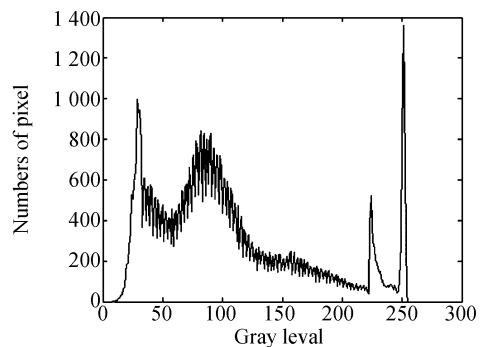
(d) 图像(a)的直方图

(d) Histogram of image (a)



(b) 直方图统计分段线性变换图像

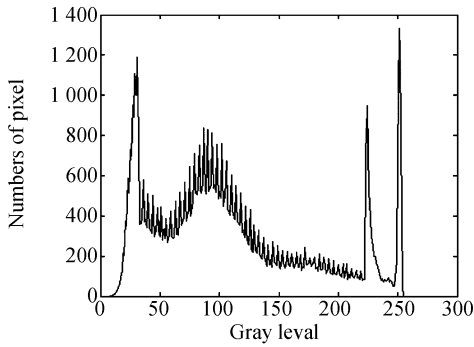
(b) Different linear normalizations on different segments using histogram



(e) 图像(b)的直方图

(e) Histogram of image (b)

仪工作环境温度为 40 °C,场景目标黑体温度为 70 °C,场景背景温度为 25 °C。从图 6 中可以看出,由于热像仪输出的原始数据是 14 bit,当场景中存在较高温度的目标时(目标与背景温差较大),数据的动态范围很大,使用一段线性变换会造成图像中大量细节丢失,导致背景被湮没。图



(f) 图像(c)的直方图

(f) Histogram of image (c)

图 6 三种算法性能比较

Fig. 6 Performance comparison of three algorithms

6(b)、(c)分别给出了直方图统计分段线性变换图像和基于局部极值的多级均值分段线性变换图像,实验结果表明两者都能够有效增强图像显示效果,丰富图像背景细节,满足系统对图像质量的要求。对应图 6,表 3 给出了三种算法性能评价表。从表 3 可以看出,与直方图统计分段线性变换增强算法相比,基于局部极值的多级均值分段线性变换增强算法实时性高,占用资源少,算法复杂度低,易于硬件实现。

表 3 三种算法性能评价表

Tab. 3 Performance evaluation of three algorithms

方法名称	信息熵	实时性/ms	占用资源/bit
一段线性灰度变换	0.559 1	1.952	32
直方图统计 分段线性变换	3.243 5	4.761	1 228 800
基于局部极值的多级 均值分段线性变换	3.145 9	3.384	28 800

参考文献:

- [1] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2006:70-91.
GONZALEZ R C. *Digital Image Processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006:70-91. (in Chinese)
- [2] 胡艳明. 一种实时红外 ATR 系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006:29-39.
HU Y M. *Design and realization of a real time IR ATR system* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006:29-39. (in Chinese)

5 结 论

为了满足红外实时图像处理系统大数据量和高实时性的要求,解决系统中热像仪输出大动态范围和监视器显示输出小动态范围之间的矛盾,设计了一种基于局部极值的多级均值分段线性变换的红外实时图像增强算法,整个算法用 FPGA 实现,较好的解决了如下问题:(1)使用图像局部极值计算每帧图像动态范围,消除了非制冷红外焦平面阵列探测器输出值随其工作时间漂移造成的影响和少量盲元造成的干扰。(2)采用多级均值分段线性变换算法,丰富了背景图像(通常温度较低)的细节,解决了高温目标进入视场后造成的背景淹没问题。(3)与传统的直方图统计算法相比,采用基于局部极值的多级均值分段线性变换算法增强后的图像信息熵仅有微弱减小,但其计算时间缩短了 1.38 ms,占用存储资源减少了 97.6%,而且仅使用一块中低端 FPGA 芯片就可以实现,无需增加外部 RAM,缩小了电路板体积,降低了产品成本。(4)利用 FPGA 设计实现整个算法,可实时对每帧图像进行增强处理,不仅满足系统需要的高实时性,同时使系统中 DSP 有充裕时间完成其它复杂运算。这种基于 FPGA 实现的红外实时图像增强方法自适应能力强,能够满足绝大多数视觉系统的图像增强,是一种很实用的视觉系统图像增强方法。

- [3] 胡谋法, 陈曾平. 一种实用的可见光图像自适应对比度增强方法[J]. 光学与光电技术, 2005,3(4): 22-25.
HU M F, CHEN Z P. A practical adaptive contrast enhancement method of the visible image [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005,3(4):22-25. (in Chinese)
- [4] 王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算[J]. 光电子学报, 2005,34(2):299-301.
WANG B J, LIU SH Q, ZHOU H X, et al.. Self-

adaptive contrast enhancement algorithm for infrared image based on plateau histogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2):299-301. (in Chinese)

- [5] 陈钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(6): 428-430.

CHEN Q, BO L F, ZHANG B M. Histogram double equalization in infrared image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(6): 428-430. (in Chinese)

- [6] 陈洪, 常青, 郭天天. 一种易于硬件实现的红外图像实时增强算法[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3):282-287.

CHEN H, CHANG Q, GUO T T. Real-time infrared image enhancing algorithm easy to implement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3):282-287. (in Chinese)

- [7] 顾国华, 冯国进, 陈钱. 二维时间延迟积分红外图像实时增强处理技术[J]. *红外技术*, 2004, 26(6): 86-88.

GU G H, FENG G J, CHEN Q. 2D-TDI real-time infrared image enhancement technique [J]. *Infrared Technology*, 2004, 26(6):86-88. (in Chinese)

- [8] RUPERT M. Image processing in an enhanced and synthetic vision system[J]. *SPIE*, 2002, 4713:168-177.

- [9] HAYAT M M, TORRES S N, CAIN S, et al.. Model-based real-time non-uniformity correction in focal plane array detectors[C]. *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing IX*, *SPIE Proc.*, 1998, 3377:122-131.

- [10] VICHERS V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(7): 1921-1926.

作者简介:



吴家伟(1981—),男,湖北武汉人,博士研究生,工程师,2004年,2007年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,现为湖北航天技术研究院总体设计所设计师,主要从事图像处理、模式识别及光电跟踪方面的研究。E-mail: jia-weiwu1981@yahoo.com.cn



虞文波(1982—),男,湖北十堰人,硕士,助理工程师,2005年,2008年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,现为湖北航天技术研究院总体设计所设计师,主要从事嵌入式系统、图像压缩等方面的研究。E-mail: t8w8b8@smail.hust.edu.cn



武春风(1975—),男,黑龙江大庆人,博士,高级工程师,1998年,2000年,2005年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为湖北航天技术研究院总体设计所主任设计师,主要从事光电精密仪器、导航制导与控制等方面的研究。E-mail: startjb@sina.com

(本栏目编辑:白雨虹)