

文章编号: 1672-8785(2012)04-0014-06

红外图像增强技术在 TMS320DM642 上的应用

黄德天^{1,2} 吴志勇¹

(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: 针对红外图像普遍存在目标与背景对比度差、边缘模糊、信噪比低和灰度层次差等缺陷, 提出了一种改进的直方图均衡红外图像增强算法。首先通过自适应地选择合适的灰度阈值, 在图像直方图中将像素所占比例小于阈值的冗余灰度级完全压缩, 并对大于阈值的有效灰度级进行基于一种非常合理的对数函数的拉伸变换; 然后对拉伸后的灰度级进行常规的直方图均衡处理; 最后在整个灰度范围内对经过均衡处理的图像灰度级进行等间距排列。为了满足算法的实时性, 设计了一种以 TMS320DM642 高性能 DSP 芯片为核心处理器的红外图像增强系统平台。实验结果表明, 采用该算法增强后的图像质量明显优于采用直方图均衡算法增强后的图像质量, 图像的目标与背景的对比度和图像的清晰度都得到了提高, 边缘细节也得到了保留; 同时, 采用该算法处理一帧 $320 \times 256 \times 8$ bits 的红外图像仅仅用时 16.73 ms, 完全满足实时图像处理的要求。

关键词: 红外图像; 直方图均衡; 实时图像处理; TMS320DM642

中图分类号: TN911.37 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.04.003

Application of Infrared Image Enhancement Technology to TMS320DM642

HUANG De-tian^{1,2}, WU Zhi-yong¹

(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: Because infrared images usually have the disadvantages of low contrast, blurry edge, low signal-to-noise ratio (SNR) and less gray levels, an improved infrared image enhancement algorithm based on histogram equalization is proposed. Firstly, by adaptively selecting an proper threshold, the redundant gray levels which have pixel sum less than the threshold are completely compressed and those effective gray levels which have pixel sum greater than the threshold are stretched on the basis of a very rational logarithm transformation. Secondly, a conventional histogram equalization method is used to process the stretched gray levels. Finally, all these equalized gray levels are arranged at an equal distance in the whole gray level area. To meet the real-time requirement, an infrared image enhancement system which uses a TMS320DM642 chip as its core processor is designed. The experimental result shows that the image enhanced by using this algorithm is obviously better than the one enhanced by using the conventional

收稿日期: 2012-02-27

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2008AA7034320B)

作者简介: 黄德天 (1985-), 男, 福建龙岩人, 博士研究生, 主要研究方向为数字图像处理的算法研究和 DSP 的实际应用。E-mail: huangdetian@sina.com

histogram equalization algorithm in quality. The object-background contrast and definition of the image are both improved and the edge details are kept. Moreover, it takes only 16.73 ms for the algorithm to process an image with $320 \times 256 \times 8$ bits. So, the requirement of real-time image processing can be satisfied completely.

Key words: infrared image; histogram equalization; real-time image processing; TMS320DM642

0 引言

红外技术已经广泛应用于战略预警、侦察、制导、导航、遥感、气象、医学诊断和科学研究等众多军事和民用领域。但由于受采集设备和外围环境等因素的影响,红外成像系统的成像效果往往不够理想,主要表现在红外图像的目标与背景对比度差、像素灰度动态范围窄、灰度层次差、边缘模糊以及信噪比低等方面^[1-3]。在实际应用中,这些影响对后续的特征提取、目标识别或目标跟踪等极为不利^[4]。因此,在进行后续处理之前,有必要先对红外图像进行图像增强等预处理。红外图像增强主要是通过扩展红外图像的灰度动态范围、提高图像对比度、增强边缘以及提高信噪比等操作来提高红外图像的质量并最大程度地保留图像中的有用信息的。

国内外已有很多红外图像增强算法,它们主要可以分为空域处理法和频域处理法两大类。其中,频域处理法可以取得较好的增强效果,但其处理过程比较复杂,需要先将图像信息从空间域变换到某种频率域,然后在频率域内对各频谱成分进行相应的处理,最后再通过相应的逆变换得到增强后的图像。该方法的计算量较大,一般难以满足实时处理的要求^[5-6]。而空域处理法基于图像自身的信息,直接对图像像素的灰度值进行处理,其计算一般较为简单。因此,在工程应用中,为了满足实时处理的要求,通常选用空域处理法。直方图均衡法是一种较为常用的空间域图像增强算法。它能够扩展图像像素的灰度动态范围,提高图像的对比度和视觉效果。但是由于直方图均衡法往往会将占较小比例的图像边缘像素也均衡掉,造成目标图像边缘的大量信息丢失,从而严重影响目标的测量精度^[7-8]。因此,有必要对直方图均衡算法进行

改进,使图像在对比度得到提高的同时,其弱边缘也得到增强(提高增强后图像的视觉效果)。

本文通过分析红外图像的自身特点和直方图的均衡缺陷,提出了一种改进的直方图均衡红外图像增强算法。该方法既压缩了红外图像的冗余灰度,又扩展了有效灰度的动态范围,实现了对有效图像灰度级的无损均衡。另外,本文还设计了一种以 TMS320DM642 高性能 DSP 芯片为核心的红外图像增强系统硬件平台。通过将本文算法移植到该系统硬件平台并对其进行适当的程序优化,得到了比较令人满意的图像视觉效果。实验结果表明,采用本文算法增强后的图像质量明显优于采用直方图均衡算法增强的图像质量,而且本文算法完全能够满足实时图像处理的要求。

1 直方图均衡图像增强算法

图像的直方图^[9-10]是反映一幅图像中的灰度级与出现这种灰度的概率之间的关系的图形。换句话说,图像的直方图表示图像中具有每种灰度的像素的个数,反映了图像中每种灰度级出现的频率,是图像的基本统计特征之一。对于一幅数字图像,一般先对其灰度范围进行归一化,即将灰度范围归一化为 $[0,1]$ 。设图像的离散灰度级为 r_k ($0 \leq r_k \leq 1$), 概率密度函数(PDF)为 $P_r(r_k)$, 其表达式为

$$P_r(r_k) = \frac{n_k}{n}$$

$$0 \leq r_k \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, l-1 \quad (1)$$

式中, l 为灰度级的数目, n_k 为图像中出现灰度级为 r_k 的像素数, n 为图像的像素总数。

直方图均衡^[9,11]是以概率论中的累积分布函数(CDF)为基础,通过修正图像的灰度直方图来达到图像增强的效果的。其基本原理是,把一幅已知灰度概率分布的图像,经过一种变换来扩展图像中比重较大的灰度级和压缩图像中

比重较小的灰度级,使之变成具有均匀概率分布的新图像。设对应的累积分布函数为 s_k , 其表达式为

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k P_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}$$

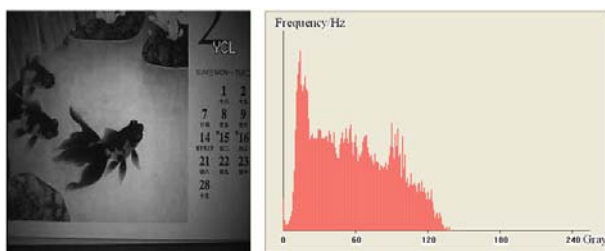
$$0 \leq r_k \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, l-1 \quad (2)$$

式中, n_j 为图像中灰度级为 r_j 上的像素数。

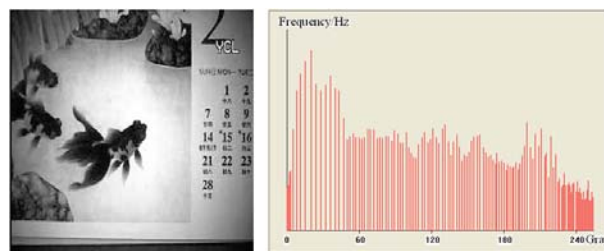
假设图像的灰度等级量化为 8 bit, 其灰度范围为 $[0, 255]$, 则累积分布函数 s_k 的非归一化形式为

$$s_k = T(r_k) = \frac{255}{n} \sum_{j=0}^k n_j$$

$$0 \leq r_k \leq 1, k = 0, 1, 2, \dots, l-1 \quad (3)$$



(a) 偏暗的原始图像及其直方图



(b) 直方图均衡化处理后的图像及其直方图

图 1 直方图均衡化处理前后的图像效果对比

2 改进的红外图像增强算法

与可见光图像相比,红外图像的灰度动态范围窄,其绝大部分像素集中在某些相邻的灰度级范围内,而在这些范围以外的灰度级上只有很少或者没有像素分布。基于红外图像的这些特点以及上述直方图均衡增强算法的缺陷,一般不能直接采用直方图均衡算法进行红外图像增强。为了在扩大红外图像的灰度动态范围的同时能够最大限度地保持原有的图像细节,本文提出一种改进的图像直方图均衡算法。首先,通过自适应地选择合适的灰度阈值,在图像直方图中将像素所占比例小于阈值的冗余灰度级完全压缩,并将大于阈值的有效灰度级作基于一种非常合理的对数函数的拉伸变换;然后,对拉伸后的灰度级进行常规的直方图均衡化处理;

最后,在整个灰度范围内对均衡化处理后的图像灰度级进行等间距排列。

假设一幅红外图像的直方图灰度集中分布在 $[a, b]$ 范围内,而在 $[0, a)$ 和 $(b, 255]$ 灰度范围内只有很少或者没有像素分布,如图 2 所示。因此,可以将灰度分布集中的 $[a, b]$ 区间内的灰度视为有效灰度,并将灰度分布较少或者为零的 $[0, a)$ 和 $(b, 255]$ 区间内的灰度视为冗余灰度。设图像的灰度直方图表示为 $his[r]$ ($r \in [0, 255]$)。

为了压缩冗余灰度和抑制无用的干扰信息,首先将直方图修正为 $his'(r)$, 其表达式为

$$his'(r) = \begin{cases} his(r) & his(r) \geq \Delta \\ 0 & his(r) < \Delta \end{cases} \quad (4)$$

式中, Δ 为进行灰度级统计的直方图阈值,其取值的合适与否将会直接影响图像的增强效果。若

选取不合适的阈值,不但不能增强图像,甚至还会降低图像质量。例如, Δ 过大会造成有效灰度被压缩,而 Δ 过小又达不到令人满意的均衡效果。假设一幅 8 位红外图像的大小为 $W \times H$, A 为该图像直方图的均值,则 $A = (W \times H)/256$ 。此时,取阈值 $\Delta = 0.3A$ 比较合适^[8]。通过这样的阈值选取,可以对原始图像直方图中像素小于阈值的无用或干扰信号进行抑制,使获得的图像对比度得到大大提高,人眼视觉效果变得较好。

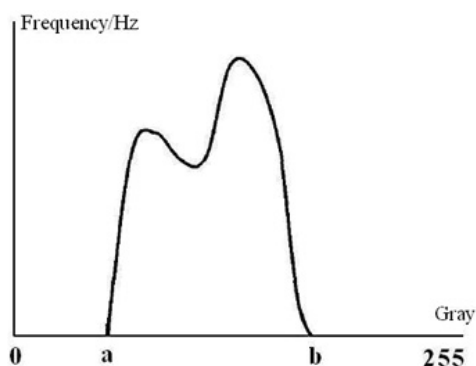


图 2 红外图像直方图

设修正后图像的概率密度函数为 $P_r(r_j)$, 其表达式为

$$P_r(r_j) = \begin{cases} \frac{n_j}{n}, & \text{his}[r] \geq \Delta \\ 0, & \text{his}[r] < \Delta \end{cases} \quad (5)$$

第二步,对 $P_r(r_j)$ 进行基于一种非常合理的对数函数的变换(变换关系见图 3),其表达式为

$$P'_r(r_j) = \lg[9P_r(r_j) + 1] \quad (6)$$

式中, $P'_r(r_j)$ 为 $P_r(r_j)$ 基于对数函数变换后的值。由 $P_r(r_j) \in [0, 1]$ 可知, $P'_r(r_j) \in [0, 1]$ 。

第三步,对 $P'_r(r_j)$ 进行归一化后得到 $P''_r(r_j)$:

$$P''_r(r_j) = \frac{P'_r(r_j)}{\sum_{j=0}^{l-1} P'_r(r_j)} \quad (7)$$

式中, l 为图像灰度级的数目。

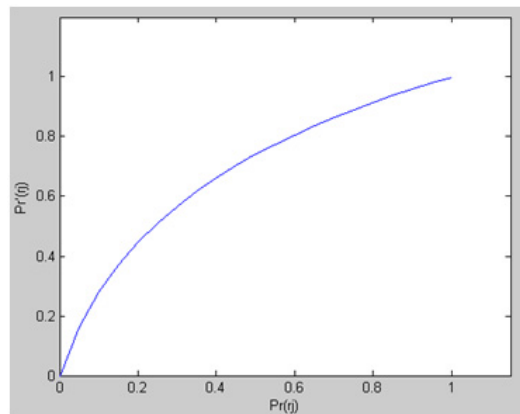


图 3 对数函数的变换关系

第四步,对 $P''_r(r_j)$ 进行常规的直方图均衡处理,其表达式为

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k P''_r(r_j) \quad (8)$$

第五步,对直方图均衡处理后的有效灰度级数目进行统计。先定义

$$f(r) = \begin{cases} 0, & \text{his}'(r) = 0 \\ 1, & \text{his}'(r) > 0 \end{cases} \quad (9)$$

再对直方图均衡处理后的有效灰度级进行直方图统计,其表达式为

$$l_{\text{effective}} = \sum_{k=0}^{255} f(k) \quad (10)$$

最后,在整个灰度范围内对这些有效灰度级进行等间距排列,其表达式为

$$T_k = j \times \frac{255}{l_{\text{effective}}}, \quad j = 0, 1, \dots, k \quad (11)$$

通过上述步骤的处理,可以获得灰度连续的红外图像,并且能够实现对有效灰度级的无损均衡。

3 红外图像增强系统的设计与实现

TMS320DM642 (DM642) 是美国德州仪器公司推出的一款高性能数字信号处理器。它采用两级 Cache 存储器体系结构,包括一个大小为 16K-Byte 的一级程序缓存 (L1P)、一个大小为

16K-Byte 的一级数据缓存 (L1D) 和一个大小为 256K-Byte 的可配置的二级存储器 / 缓存 (L2)。片内含有 64 个通用寄存器 (A0 ~ A31、B0 ~ B31) 和 8 个互相独立但可并行工作的功能单元 (.L1、. L2、. S1、. S2、. D1、. D2、. M1 和 . M2)。通过高效的流水线操作, 一个指令周期最多可并行处理 8 条指令。在 720 MHz 主频下, 处理速度可以达到 5760 MIPS(每秒百万条指令)。此外, DM642 还带有 64 个独立的可配置的快速 EDMA 通道、能与各种各样的外部存储器实现无缝连接的 EMIFA 接口和 3 个可配置的视频口 (VP0、VP1、VP2) 等^[13]。因此, DM642 非常适合于解决一些复杂图像处理算法的实时性问题。图 4 所示为本文设计的实时红外图像增强系统的框架。其主要功能模块包括图像信号转换单元、数字图像处理单元、数字图像存储单元和数字图像编码单元。

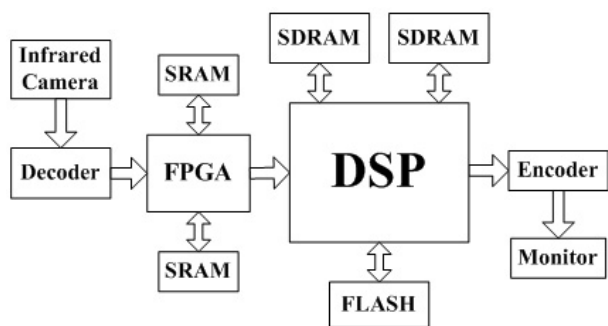


图 4 实时红外图像增强系统的原理图

该系统的硬件平台设计选用 DM642 作为核心处理器, 并结合拥有大量逻辑单元的 EP3C55F484 FPGA 芯片对采集到的红外图像进行预处理。整个系统的工作流程如下: 从红外相机的 Camera Link 接口送出的图像信号, 被 DS90CR288A 解出相机的时钟信号 (CLK)、帧有效信号 (FVAL)、行有效信号 (LVAL)、数据有效信号 (DVAL) 以及对应的视频图像信号, 并被送入 FPGA。FPGA 在相机时钟信号的控制下, 采用乒乓操作的方式, 在对 SRAM1 中的图像信号进行处理的同时, 将 DS90CR288A 送入的图像信号存入 SRAM2 中; 而在对 SRAM2 中的图像信号进行处理的同时, 将 DS90CR288A 送入的图像信号存入 SRAM1 中; FPGA 对图像信号主要

进行中值滤波等预处理和完成图像灰度级的统计。然后, FPGA 将灰度级统计数据 and 预处理后的图像数据送入 DSP。DSP 根据自适应选择的灰度阈值进一步完成图像增强算法。最后, 增强处理后的红外图像信号经 SAA7121H 编码, 生成标准视频并在监视器上实时显示出来。

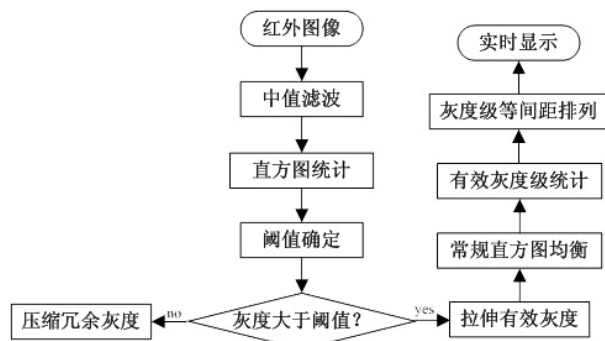


图 5 软件算法的流程图

图 5 所示为该系统的算法流程。在软件方面, 首先将算法移植到 DSP 处理器上, 然后应用编译器选项、内联函数、循环展开和软件流水等程序优化方法^[14-15]对整体代码进行优化, 最后将耗时较多的代码改用线性汇编语言实现, 进一步优化代码, 使 DSP 的多个功能单元并行工作。由后面的实验结果可知, 本文算法在该红外图像增强硬件平台上处理一帧 $320 \times 256 \times 8$ bits 图像的用时仅为 16.73 ms, 完全满足红外图像实时显示的要求。

4 实验结果及分析

为了验证该红外图像增强系统的实时性及算法的有效性, 我们做了大量实验。下面给出其中的一组实验结果 (见图 6)。实验中, 红外图像的大小为 320×256 。图 6(a) 为原始红外图像, 图 6(b) 为采用直方图均衡算法增强处理后的红外图像, 图 6(c) 为采用本文算法增强处理后的红外图像。从中可以明显地看出, 与图 6(a) 相比, 图 6(b) 中图像的对比度明显得到提高, 图像质量也有所改善, 但其噪声被放大, 而且无法突出细节; 图像的部分边缘丢失, 总体视觉效果一般。而图 6(c) 在图像对比度得到提高的同时, 噪声被抑制, 边缘细节也得到了较好的保留。其清晰度高, 图像视觉效果明显优于图 6(b)。

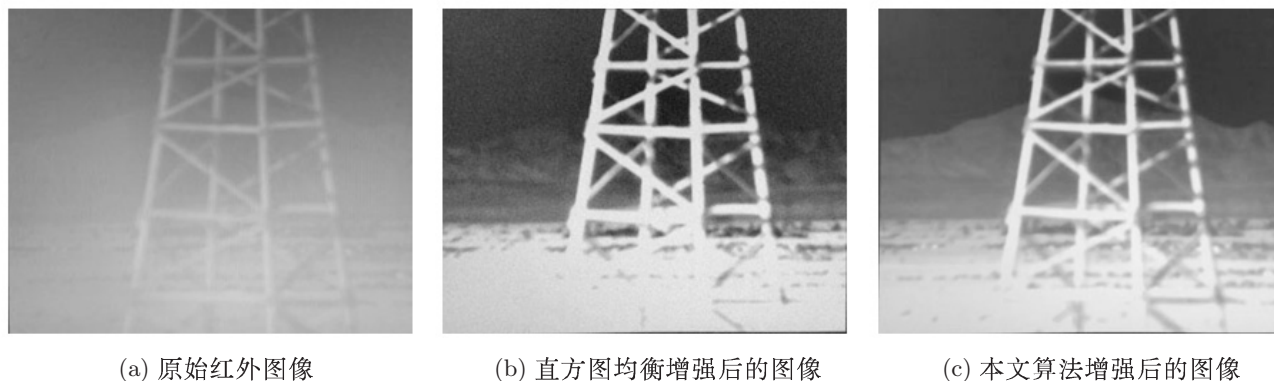


图 6 采用不同算法增强图像后的效果比较

为了定量评价算法的增强效果, 本文采用模糊指数 (Fuzzy Index) ^[16] 对图像增强效果进行评估:

$$F_B = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \min[P(i, j), 1 - P(i, j)] \quad (12)$$

式中, $P(i, j) = \sin[0.5\pi(1 - I(i, j)/I_{\max})]$, $I(i, j)$ 和 $I_{\max}$ 分别为图像在 (i, j) 上的灰度值和最大灰度值。根据模糊指数的定义, 图像的清晰度会随着模糊指数的减小而增加。

采用模糊指数评价标准分别对图 6 中的原始红外图像、直方图均衡处理后的图像以及本文算法增强后的图像进行计算, 得出了表 1 所示的结果。从表 1 中可以看出, 本文算法对红外图像的增强效果明显优于直方图均衡算法。

表 1 图 6 中增强前后红外图像的
模糊指数对比

Fuzzy Index	原始红外图像	直方图均衡后的图像	本文算法增强后的图像
F_B	0.4372	0.2408	0.0619

5 结论

本文通过分析红外图像的特点和直方图均衡增强处理的缺陷, 提出了一种改进的直方图均衡红外图像增强算法。该算法通过压缩红外图像直方图中分布较少的冗余灰度和扩展分布集中的有效灰度的动态范围, 既提高了整幅图像的对比度, 又避免了红外图像边缘细节的丢失。另外, 本文将高性能 DSP 芯片与大容量 FPGA 芯片相结合, 设计并实现了实时红外图像增强系

统的硬件平台。从该硬件平台得到的实验结果表明, 采用本文算法增强后的红外图像视觉效果明显优于采用直方图均衡算法增强后的视觉效果, 图像的对比度和清晰度都得到了提高, 边缘细节也得到了较好的保留。另外, 模糊指数从 0.2408 下降到了 0.0619, 说明本文算法要优于直方图均衡算法。同时, 采用本文算法处理一帧 $320 \times 256 \times 8$ bits 图像的用时仅为 16.73 ms, 完全满足图像实时处理的要求。

参考文献

- [1] 孙海江, 王延杰, 刘伟宁. 基于自适应平台阈值和拉普拉斯变换的红外图像增强 [J]. 中国光学, 2011, 4(5): 474-479.
- [2] 王群, 何永强, 周云川. 基于小波和侧抑制网络的红外图像增强算法 [J]. 红外技术, 2011, 33(9): 541-544.
- [3] 刘松涛, 吴钢. 基于广义直方图均衡的图像增强新方法 [J]. 电光与控制, 2010, 17(3): 12-14.
- [4] 张锐. 基于 SOPC 的红外图像增强算法研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2011.
- [5] Subramanyam R V P, Prasun K R. Magnetic Resonance Image Enhancement Using Stochastic Resonance in Fourier Domain [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2010, 21(1): 1-13.
- [6] 彭洲, 赵保军. 基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外图像增强算法 [J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 635-640.
- [7] 王雷雷, 金学波. 基于 S 曲线多尺度 Retinex 红外图像增强算法 [J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(5): 763-766.
- [8] 李怀琼, 陈钱. 基于灰度冗余的红外图像自适应输出窗技术 [J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1426-1429.

(下转第 25 页)