

文章编号:1007-2780(2014)05-0793-07

基于 FPGA 的航拍图像实时增强

赵 凡^{1,2}, 张 葆^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了更好地增强图像的细节信息、提高图像的对比度,提出了基于子层分割对比度拉伸算法。根据直方图特征将其平均分为 4 个子层区域,在每个子层中根据其灰度值概率密度之和的大小对灰度区域进行拓展或压缩。为了防止灰度区域被过分压缩或拉伸,引入了约束因子 α 。以现场可编程门阵列作为中央处理器,采用组合逻辑对本文算法进行建模。在得到直方图统计结果的基础上,算法可在一个时钟周期完成,相比于流水线操作时间减少了 5×10^3 ns,可满足 50 frame/s 的实时图像处理要求。该系统具有集成度高、图像处理速度快和实时性强等特点。

关键词: 图像增强;子层分割;FPGA;即时操作;组合逻辑

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142905.0793

Aerial image enhancement processing based on FPGA

ZHAO Fan^{1,2}, ZHANG Bao^{1*}

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement,
Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to enhance the image details and improve image contrast, this paper presents a contrast stretch sub-layer segmentation algorithm. First, the histogram is divided into four sub-layer equally according to feature of the histogram. In each sub-layer, the sub-layer are expanded or compressed on the basis of the probability density of gray value. In order to prevent the gray area being overly compressed or stretched, the constraint factor α is introduced. By applying field programmable gate array (FPGA) as the central processor, the algorithm is modeled on combination of logic modeling. Based on the histogram statistics results, the algorithm can be completed in a single clock cycle, and the time was reduced by 5×10^3 ns compared to the pipeline operation. This system can meet the requirements of real-time processing for 50 frames/s image processing and has high integration, and high image processing speed and real-time features.

Key words: image enhancement; segmentation sub-layer; FPGA; real-time operation; combinational logic

收稿日期:2013-10-29;修订日期:2014-01-02.

基金项目:863 计划项目(No. 2008AA121803)

* 通信联系人, E-mail: zhangb@ciomp.ac.cn

1 引言

图像增强主要是将图像转换为更适合人眼观察或者机器分析、识别的形式,改善图像的质量和视觉效果,以便获得更清楚、明晰的富含大量有用信息的可使用图像^[1-4]。对于航拍图像,由于恶劣的天气条件和拍摄距离远会使图像的对比度低、图像的纹理细节模糊^[5-6]。因此,改善图像的对比度、增强图像的纹理信息是航拍图像增强中的重要部分。

直方图均衡化是增强图像对比度的一种常见方法^[7-8],该方法将图像的直方图变为均匀分布的形式,来增大灰度值的动态范围。单一形式的全局均衡化会造成一些灰度级的合并,使得一些细节信息缺失。对图像进行分段拉伸也是一种常见算法^[9-10],但是分段拉伸算法的关键点在于分段点的选择,分段点的选择稍有不慎便影响了整幅图像的增强效果。本文提出了一种能够提高图像对比度、增强图像纹理细节的算法。首先将原始直方图进行子层分割,根据子层灰度概率密度之和的大小将灰度概率密度较大的灰度值动态范围进行扩展。通过对分割后子层灰度范围的重新定义,完成灰度范围拉伸,从而提高图像的整体对比度。

在图像增强的硬件实现上,现场可编程门阵列(FPGA)在结构上的并行处理优势使得其更适合完成高速的运算能力^[11-13]。该系统采用 cyclone3 系列的 EP3C16FPGA 为处理器,具有实现简单、集成度高、功耗低的特点,同时系统结构性强,具有很大的灵活性。流水线操作设计是 FPGA 中常用的设计思想与技术之一,利用它可以提高时钟频率,降低功耗。流水线系统为级联结构,各级通过存贮元件分开^[14-15]。流水线最大特点是数据流在各步骤在时间上是连续的,并且每步运算都是在时钟的控制下进行的,如果每步执行时间并不相等,流水线就会产生“瓶颈”,降低了数据处理效率。而组合逻辑引起的时序事件,没有时钟的控制,采用组合逻辑对本文算法进行建模,则能够快速高效地进行运算。

2 子层分割对比度拉伸增强原理及算法

为了更好地对图像中的目标增强,突出其信

息,通常我们会用直方图分割。通过将直方图分割成几个子区域,然后根据子层直方图的特征,在每个子区域中完成该区域灰度范围的拓展或压缩。增大灰度概率密度较大子层的动态范围,压缩概率密度较小子层的灰度值范围。通过直方图灰度范围的重新映射,能有效扩大对比度,提高视觉效果。

将原始直方图按其灰度级范围平均分割为 n 个区域,即 $SR_0, SR_1, \dots, SR_{n-1}$ 。为了增大处理后图像的对比度,在这几个区域中对灰度级进行拉伸。我们采取以下方法对灰度范围进行拉伸或压缩:

$$SSH_k = \sum_{i=SR_k}^{SR_{k+1}} h(X_i), \quad (1)$$

其中: $h(X_i)$ 是图像中灰度级为 X_i 的像素个数, SSH_k 则表示在分割的后的 SR_k 与 SR_{k+1} 区间内所有灰度级的像素个数和,反映到直方图上也就是 SR_k 与 SR_{k+1} 区间的面积。该子层区域占全局直方图的比例为:

$$ASH_k = \frac{SSH_k}{n}, \quad (2)$$

其中: n 为图像中所有像素数和。该子层区域反映到表示灰度值的横坐标上为:

$$SSR_k = L \times ASH_k, \quad (3)$$

其中: L 为灰度最大值, SSR_k 为区域 SR_k 重新定义后的区域。从上述公式可以看出,重新定义后的区域 SSR_k 与原始区域 SR_k 的面积成正比。

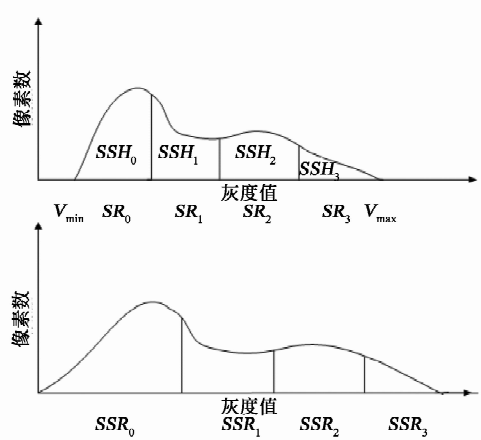


图 1 子层分割

Fig. 1 Sub-layer segmentation

考虑到图像的增强后效果以及计算量,本文中将直方图分为 4 个子层,每个子层经拉伸或压

缩后如图 1 所示。可以看出灰度密度概率和较大的区域如 SR_0 , 经过映射后其灰度范围 SSR_0 较广。灰度级拉伸后, 图像的对比度得到了提高。

为了避免子层直方图灰度范围被过分拉伸或者压缩, 我们对子层灰度区域的重新映射过程加以约束:

$$r = \frac{L}{k}, \quad (4)$$

其中: L 为灰度最大值, k 为所划分子层区域的个数。我们将重新拉伸或者压缩后的子层灰度区域范围约束为:

$$ASSR_k = SSR_k + \alpha(r - SSR_k), \quad (5)$$

其中: α 为子层灰度范围约束参数, $ASSR_k$ 为子层 SSR_k 经过约束后的灰度值区域。从该公式可以看出, 当 SSR_k 小于 r 时, 则经过约束后子层 k 的灰度值范围 $ASSR_k$ 大于经过压缩后子层 k 的灰度值范围 SSR_k , 也就意味着经过约束后, 避免了概率密度之和较小区域被过分压缩的缺点。当参数 α 取值 0.5 时, $ASSR_k$ 与 SSR_k 之间的关系反映到视觉上, 可以用图 2 表示。

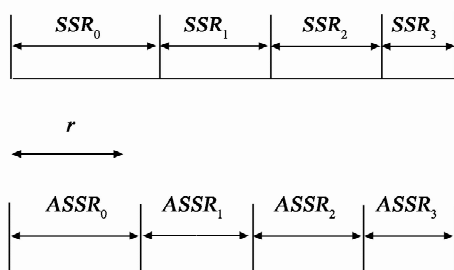


图 2 子层范围约束

Fig. 2 Sublayer range constraints

由图 2 可以看出, 原本灰度值范围较大的 SSR_0 经过此约束后范围变为 $ASSR_0$, 明显变小, 而与 r 相等的区域 SSR_1 、 SSR_2 经过此变换后保持不变, 小于 r 的区域 SSR_3 约束为范围 $ASSR_3$, 范围变大, 也就防止了累积概率密度之和较小的区域被过分压缩。

子层灰度级经过拉伸或者压缩后, 输入灰度值所对应的输出灰度值为:

$$O(n) = (I(n) - SR_k) \times ASH_k + \sum_{i=0}^k ASSR_i, \quad (6)$$

其中: $I(n)$ 为输入图像的灰度值, $O(n)$ 为该输入灰度值对应输出灰度值。

3 硬件实现

该系统以 EP3C 系列 FPGA 为主处理器, 完成图像的增强处理, 系统的结构框图如图 3 所示。

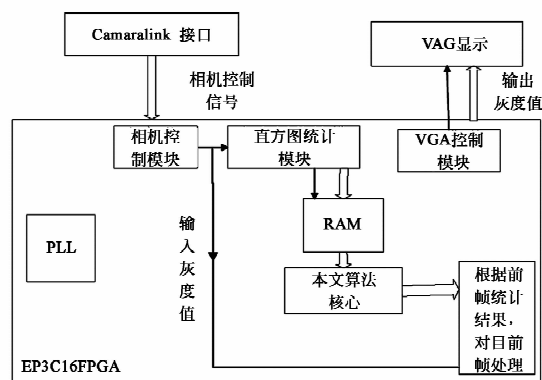


图 3 系统结构框图

Fig. 3 System block diagram

系统工作流程为: 在 FPGA 相机控制模块的控制下采集来自相机的图像, 经过本文算法处理后, 显示在 VGA 上。具体实现过程如下。由于图像具有实时性的特点, 在连续两帧图像变化不大的假设下, 根据前一帧直方图统计结果对后一帧进行处理。在相机控制信号的控制下, 在帧有效, 行有效和数据有效的前提下, 一个像素时钟 FPGA 接收一个有效数据, 将灰度值作为 RAM 地址, 不同地址中的数值表示该亮度的像素数, 进行直方图统计, 并在统计过程中求得最小与最大值灰度值 $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 。算法的实现具体步骤为:

步骤 1: 根据直方图统计结果, 在最大值与最小值间平分 4 个区域。

步骤 2: 分别求出每个区域的面积。

步骤 3: 每个区域归一化处理, 得到每个区域灰度级范围的重新映射。

步骤 4: 根据每个灰度值范围的大小, 加约束条件, 求得最终每个区域的灰度级范围。最终根据步骤 1~4 所求得的结果带入公式(6)中。这样在下一帧图像的每个像素灰度值输入的同时可以求得对应的输出灰度值。

由于本文系统图像的采集是实时性的, 所以系统处理具有实时性的要求。流水线处理是高速设计中一个比较常用的设计步骤, 流水操作是在时钟 CLK 的控制下按照步骤进行的, 且整个数据

流的处理是单流向的,它是将某个设计处理流程分为若干步骤(串联起来)。如果本文算法按照流水操作,则可以按照如图 4 的步骤流程进行。

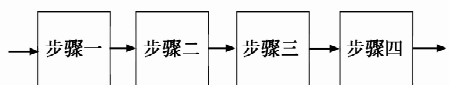


图 4 流水线操作

Fig. 4 Pipelining operation

流水线操作的最大特点是,数据流在各个步骤的处理从时间上看是连续的,每个步骤是在时钟的控制下进行的,且前一个步骤的输出是后一个步骤的输入。本文处理过程中,步骤 1 ($V_{\max} - V_{\min})/4$ 完成需要 1 个时钟周期,步骤 2 中从 RAM 地址 $V_{\min}$ 与 $V_{\max}$ 之间将对应地址中数值相加,得到每个区域面积,需要 $V_{\max} - V_{\min}$ 个时钟周期,步骤三需要 1 个时钟周期,步骤 4 需要 1 个时钟周期。由于步骤 2 所需时间较长,在步骤 2 处理过程中,步骤 3 需要等待很长时间。流水线各段执行时间不相等,流水线就会产生堵塞,按照上述计算,本文算法完成一条线性流水线需要 $V_{\max} - V_{\min} + 3$ 个时钟周期。

用流水线加速比(T_p)来衡量流水线的有效性,流水线加速比是指在完成同样 n 个任务的情况下,非流水线所需的顺序执行时间与流水线所需的执行时间的比值。

$$T_p = \frac{n \sum_{i=1}^k Dt_i}{\sum_{i=1}^K Dt_i + (n-1) \max(Dt_1, Dt_2, \dots, Dt_k)} \quad (7)$$

其中: n 为任务数, K 为一条流水线上的段数, Dt 表示每段完成需要的时钟周期。本文中每秒需要处理图像数为 50 帧,即任务数为 50,每条流水线需要分为 4 步完成,所以 k 取值 4,所以 $T_p = 50 [1+1+(V_{\max} - V_{\min}) + 1] / [(1+1+(V_{\max} - V_{\min}) + 1) + 49(V_{\max} - V_{\min})]$ 趋近于 1,所以该流水线的性能并不好,处理速度比较慢,在对实时性要求较高时,流水线操作并不能满足要求。

组合逻辑没有时钟的控制。利用 FPGA 可以并行执行程序的特点,采用组合逻辑对本文算法进行建模,使之能够快速高效地进行运算。本文将由组合逻辑引起的事件称为即时事件,特征

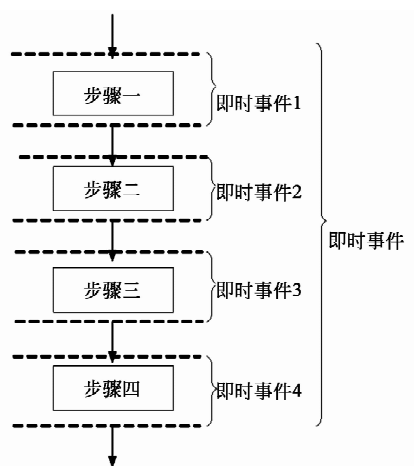


图 5 组合逻辑的即时事件

Fig. 5 Immediate action of combinational logic

是不受时钟沿的控制。如图 5 所示。

我们把算法的每一个步骤当作一个即时事件,根据组合逻辑的特点,每个即时事件可在一个时钟周期内完成,4 个即时事件可并行执行,全部总合起来也是引起一个即时事件,所以可以在一个时钟周期内完成。本文算法的建模图如图 6 所示。

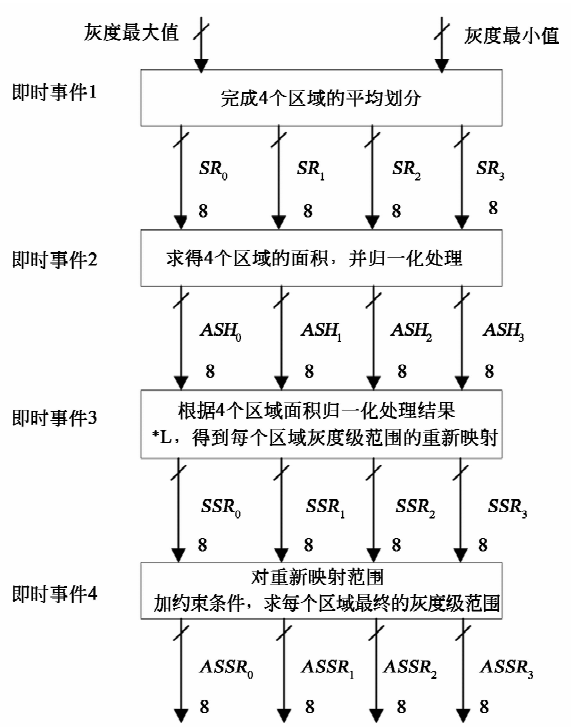


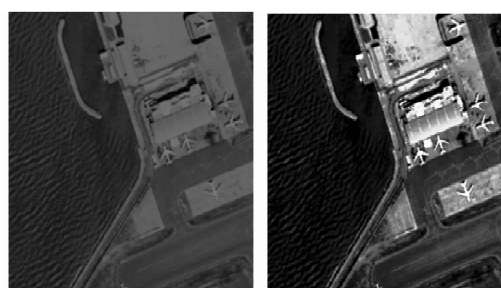
图 6 本文算法即时式的建模图

Fig. 6 Modeling of instant style of proposed algorithm

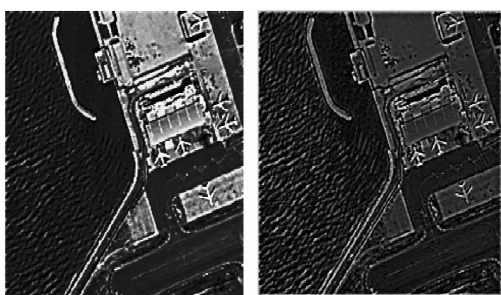
即时事件1是执行增强算法运算的任务模块,它的输入是由直方图统计得到的灰度最大值和灰度最小值。它根据输入最大和最小灰度值运算以后,将区域划分结果输出给下一个任务模块即时事件2,依次进行,等第四任务模块完成时,完成一帧图像的处理。采用组合逻辑对本文算法进行建模,使之能够快速高效地进行运算,整个算法在一个时钟周期内即可完成,相对于流水线操作处理速度明显提高。

4 实验结果及分析

图7(a)图像大小为 256×256 。本文通过对原始图像观察,可以发现,灰度值比较集中,反映到图像中就是细节不明显,对比度低。同时原始图像主要的轮廓不明显。



(a) 原始图像
(a) Original image
(b) 区域多直方图红外图像增强方法(RHE)结果
(b) RHE result



(c) 本文算法 $\alpha=0$ 时结果
(c) Enhancement result by proposed algorithm $\alpha=0$
(d) 本文算法 $\alpha=0.5$ 时增强结果
(d) Enhancement result by proposed algorithm $\alpha=0.5$

图7 不同算法图像增强后效果

Fig. 7 Performance comparison of different algorithms

区域多直方图红外图像增强方法(RHE)是通过对直方图分层,在每个子层进行直方图均衡化来达到对图像增强的目的。这种基于分层的直方图均衡化相对于直方图均衡化(HE)有了一定改进,由于该方法都是基于直方图分割的,在每个子层做直方图均衡化处理,经过处理后直方图的灰度范围得到了拓展,从(b)可以看出经过RHE算法处理后图像的对比度得到了很好的提高,但是由于这类方法是基于直方图均衡化的,不可避免地会导致灰度级合并,通过直方图均衡化后图像,灰度值较小区域更暗,不能显现出水纹的细节信息,且灰度值较大区域过亮,失去原有纹理信息。本文算法 $\alpha=0$ 时增强后的图像较RHE算法处理后图像相比,图像效果有了明显改进,可以看到图中的水纹细节信息。但是 $\alpha=0$ 该算法对子层区域灰度值范围的拉伸或压缩时,存在过度拉伸或压缩的缺点,灰度值较小的像素点经过范围拓展后灰度值更小,图7(c)所示,部分区域过暗,水纹的细节信息不明显,同时灰度值较大区域的灰度值经拉伸后灰度值更大。图7(d)为当 $\alpha=0.5$ 时,经过处理后图像。该灰度范围较原图明显增大,但是在 α 的约束下,灰度值范围没有被过分拉伸,所以明显看出整幅图像的细节信息,视觉效果很好。

本文采用灰度平均梯度值(GMG)以及信息熵来判断增强算法的效果和有效性。灰度平均梯度值是分别将图像长度和宽度方向上的相邻像素灰度值做差后求平方和再求均方根值,它能较好地反映图像的对比度和纹理变化特征,其值越大表示图像越清晰,图像质量越好。公式为:

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}{2}} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[g(i,j+1) - g(i,j)]^2 + [g(i+1,j) - g(i,j)]^2}{2}} \quad (10)$$

而信息熵代表图像中所有信息状态所具有的平均信息量,作为图像质量的评价标准,信息熵越大意味着图像中细节信息越多,视觉效果越好^[16],定义为:

$$E_n = - \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \log_2 p(i), \quad (11)$$

其中: $p(i)$ 表示灰度值为 i 的概率密度。

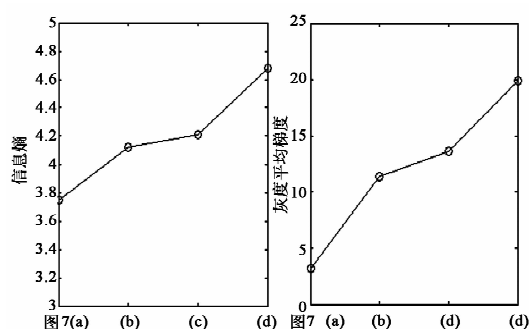


图 8 不同算法处理后图像信息熵以及 GMG

Fig. 8 Image information entropy and GMG of enhanced image after different algorithms

由图 8 可以看出经过本文算法处理后图像的 GMG 以及信息熵最大。

为了验证采用即时操作实现该算法的有效性,本文采用即时操作对图 7(a)进行了处理与普通实现方法、流水线操作方式进行了比较。图 7(a)图像大小为 256×256 。

表 1 三种操作性能比较

Tab. 1 Performance evaluation of three performances

	普通操作	流水线操作	即时操作
时间	1.315 2 ms/帧	1.315 ms/帧	1.31 ms/帧

表 1 给出了 3 种操作的性能评价,可以看出,完成图 7(a)的增强处理,采用即时操作相比于流水线操作时间减少了 5×10^3 ns,比普通操作时间减少 5.2×10^3 ns。运行速度明显提高。

5 结 论

为了提高图像对比度、增强图像纹理细节,提出了一种子层分割灰度拉伸算法,根据子层灰度概率密度之和的大小将灰度概率密度较大的灰度值动态范围进行扩展或压缩,为了防止区间被过分拓展或压缩,运用系数 α 加以约束,完成灰度范围拉伸,从而提高图像的整体对比度。本文方法处理后的图像,细节丰富,灰度动态范围宽,该算法很大程度上改善图像了的清晰度和视觉质量。该增强系统采用 FPGA 作为整个算法的中央处理器,根据 FPGA 并行执行的特点,采用组合逻辑对本文算法进行建模,算法可在一个时钟周期内完成,相比于流水线操作时间提高 5×10^3 ns。该系统具有集成度高、图像处理速度快和实时性强等特点。结果表明,该算法在硬件实现上,能够有效地实现预期目标,基本可以实现工程应用。

参 考 文 献:

- [1] Rui L. A quantitative measure based infrared image enhancement algorithm using plateau histogram [J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 4283-4288.
- [2] 贺柏根, 刘剑. 基于 DSP+FPGA 的实时图像去雾增强系统设计[J]. 液晶与显示, 2013, 6(28): 968-972.
He B G, Liu J. Real-time image defogging and enhanced system designed based on DSP+FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2013, 6(28): 968-972. (in Chinese)
- [3] Xiang Z B. Image enhancement using multi scale image features extracted by top-hat transform [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44: 328-336.
- [4] 尹传历, 王啸哲. 机载嵌入式图像增强系统设计与实现[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 604-607.
Yin C L, Wang X Z. Design and realization of airborne embedded image enhancement system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2013, 28(4): 604-607. (in Chinese)
- [5] 孙伟, 李健. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1040-1046.
Sun W, Li D J. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 1040-1046. (in Chinese)
- [6] 易盟, 郭宝龙. 结合优化梯度滤波与投影不变的航拍视频配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 651-660.
Yi M, Guo B L. Aerial video registration combining optimal gradient filters and projective invariant [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 651-660. (in Chinese)
- [7] Turgay C. Two-dimensional histogram equalization and contrast enhancement [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45:

- 3810-3824.
- [8] Lee Chulwoo, Lee Chul. Power-constrained contrast enhancement for emissive displays based on histogram equalization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(1): 80-93.
- [9] 牛英宇. 图像自适应分段线性拉伸算法的FPGA设计[J]. *现代电子技术*, 2010, 10: 78-80.
Niu Y Y. Implementation of adaptive-piecewise linear stretching algorithm based on FPGA [J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 10: 78-80. (in Chinese)
- [10] 武治国, 王延杰. 一种基于直方图非线性变换的图像对比度增强方法 [J]. *光子学报*, 2010, 39(4): 755-758.
Wu Z G, Wang Y J. An image enhancement algorithm based on histogram nonlinear transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(4): 755-758.
- [11] Hamouda M. An efficient dsp-fpga-based real-time implementation method of SVM algorithms for an indirect matrix converter [J]. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2011, 58(11): 5024-5031.
- [12] 熊文彬, 蒋泉. 基于FPGA实现的视频显示系统[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(1): 92-95.
Xiong W B, Jiang Q. Video display system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2011, 26(1): 92-95. (in Chinese)
- [13] 刘春香, 郭永飞. 星上多通道遥感图像的实时合成压缩[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 445-453.
Liu C X, Guo Y F. Composition and compression of satellite multi-channel remote sensing images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 445-453. (in Chinese)
- [14] Porikli F. Constant time $O(1)$ bilateral filtering [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008.
- [15] Paris S, Durand F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [C]. *ECCV*, 2006: 568-580. (in Chinese)
- [16] 韩希珍. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1382-1388.
Han X Z. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1382-1388. (in Chinese)

作者简介: 赵凡(1988—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要研究方向是嵌入式系统。E-mail: 923728663@qq.com