

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.012

基于 FPGA 的快速图像纹理特征提取方法的研究^{*}

裴晓芳^{1,2,3} 王 浩^{1,3} 宋 林^{1,3}

- (1. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044;
2. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;
3. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要:图像特征的一个重要分支就是纹理特征,它体现了不同图像和物体的形态、大小、分布、方向等重要参数,对图像特征识别起到决定性因素。但是纹理特征提取的过程十分复杂且计算量巨大,为了解决这个难题,提出了一种在现场可编程逻辑门阵列(FPGA)平台下实现纹理特征提取新方法。首先对基本图像特征算法做了并行化的优化,从算法的数值范围和表示精度两个角度,做了相应的分析和误差控制,从而适应FPGA的运行。然后对FPGA的数据流传输提出了一个高效率的解决办法,该方法对其中的主要模块采用了流水线优化,并采用寄存器配置模式,从而在线地修改参数,适应不同的图像大小和卷积核等环境变量。结果表明,在同等功耗条件下,可以达到10倍于CPU的性能,达到了快速提取特征的目的。

关键词:FPGA;卷积核;纹理特征;滤波器

中图分类号: TP391.4; TH79 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.20

Research of fast image texture feature extraction method based on FPGA

Pei Xiaofang^{1, 2, 3} Wang Jie^{1,3} Song Lin^{1,3}

- (1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
3. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract:The image feature is an important branch of texture feature, which reflects the different images and object shape, size, distribution, direction, and other important parameters and plays a decisive factor on image characteristics recognition. But the texture feature extraction process is very complex and time cost. In order to solve the problem, a new method to extract texture feature based on FPGA is implemented. First, the texture feature extraction method is optimized with parallel algorithm, then the error is analyzed and controlled based on numerical range and representation accuracy, so the method can operate on FPGA efficiently. Also, a method to improve the data stream transmission on FPGA is designed, which employs pipeline optimization on main modules and register allocation model. The system on FPGA can modify parameters on-line to adapt for different environmental variables, such as image size, convolution kernel and so on. The results show that the proposed model extracts image texture feature up to ten times faster than CPU under the same power consumption, and it is an ideal system to fast extract image texture feature based on FPGA.

Keywords:FPGA; convolution kernel; texture feature; filter

1 引言

正文字对于图像的纹理特征的提取和分类,目前学术界提出了多种方法,Crosier总结主要包括基本图像处理方法和机器学习算法两种^[1]。目前国内外很多专家学者,Broadhurst、Caputo对基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的算法实现,做了相关的理论分析和实际实现。Caputo利用Cordic算法实现快速三角函数计算,其充分利用了移位和加法等简单操作代替了流程复杂资源占用率高的乘法操作,在流水线机制下实现了相应操作^[2-3]。Caputo、Engquist利用快速傅里叶变换(FFT)算法并行化的特点,在FPGA上快速实现傅里叶变换。结合很多研究结论,对于FPGA上实现需要提供一个并行化程度高、流程简单、可重复性高的算法作为支撑^[4]。

对于FPGA而言,具有大量的独立乘法器、逻辑单元和布线资源等。其优势包括:1)可以根据实际所需,采用具体的数据位宽(对于CPU只能使用固定位宽计算);2)由于图像处理的连续性,可以根据不同的算法采用定制Pipeline流水线结构;3)合理的资源分配和缓冲机制,极大地降低对外部存储器的带宽需求;4)FPGA片上实现以太网(包括UDP协议栈)和HDMI等协议,方便应用和调试;5)硬件描述语言(HDL)的充分参数化和抽象化,实现可移植和可重配置;6)利用内部存储器解决高速模块和低速模块的结合;7)其功耗低、效能比很高,适合嵌入式应用。同时基于FPGA的设计可以为后期IC(集成电路)设计提供前期的功能验证。与此同时,先进的数学优化方法是必不可少的。

现代FPGA技术,可以实现提升二维和三维图像处理的速度。其应用范围包括二维和三维图像的去噪、恢复、分割、形态学形状恢复和匹配向量场可视化与仿真。Klupsch基于FPGA的硬件实现,将从高度并行的算法和保留了算法模型正确效果的适度数字精度中获利。而且不同的变形体能够通过在相同的硬件上上传一个新的程序到FPGA当中来实现。这将在实时性能不可或缺的应用当中,充分利用这些可变的图形处理方法^[5]。

本文采用定点的方案,对Basic Image Features算法中变量和参数的阈值区间和鲁棒性做了分析,从而实现定点位宽的确定和误差控制,可以极大地提高图像纹理特征的提取速度,解决了提取算法对性能的需求。同时其低功耗的设计,可以嵌入到微型设备中,使得该算法和模式识别等技术得到更广泛的实际应用。

2 数学理论的优化

图像纹理分类的方法有很多,其中主流的包括:

1)利用小波变换,提取方向和大小特征;2)基于方向与频率分解的旋转不变性来分类;3)基于基本图像特征。前两种分类方法的鲁棒性和分类效果上相对较差,所以本文选用了具有较大维数的基本图像特征方法来实现^[6]。

2.1 基本图像特征

基本图像特征是利用六个高斯导数滤波器组成的滤波器响应空间划分出的七种不同的纹理特征。这些滤波器可以在一定范围内,很好地描述图像的纹理信息。同时,高斯导数可以实现对于任意旋转的一阶或二阶滤波器的响应,使用偏微分滤波器的线性组合来计算^[7]。

高斯函数的一维表达式如下:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (1)$$

高斯函数导数的一维表达式,如下:

$$G_\eta(x) = \frac{d^\eta}{dx^\eta} G(x) = (-\frac{1}{\sqrt{2}\sigma})^\eta H_n(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}) G(x) \quad (2)$$

上式中: σ 为高斯滤波器的方差,下标 η 为导数的阶数, H_n 为Hermite多项式,其表达式如下:

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2} \quad (3)$$

而二维的高斯导数滤波器,可以使用两个维度上偏微分的乘积来表示,如下:

$$G_{nm}(x, y) = G_n(x) G_m(y) \quad (4)$$

从而利用图像函数与二维的高斯导数滤波器进行卷积,求出响应方程,如下:

$$C_{ij}(x, y) = G_{nm}(x, y) * f(x, y) \quad (5)$$

再将其进行归一化处理,如下:

$$S_{ij}(x, y) = \sigma^{i+j} C_{ij} \quad 0 \leq i + j \leq 2 \quad (6)$$

于是利用相同大小的1个零阶、2个一阶和3个二阶高斯导数滤波器组成一个滤波器组,并将这些滤波器的响应组成一个向量,来构成滤波器的响应空间^[8]。滤波器响应空间被划分为7个区域,每个区域对应一种基本图像特征,代表着该图像的一种基于局部对称性的明显特征^[9]。

基本图像特征算法的提取过程如下:

1)计算高斯滤波器响应,然后将计算结果标准化及 $S_{ij} = \sigma^{i+j} C_{ij}$ 。

2)计算中间变量 $\lambda = S_{2o} + S_{o2}$ 和 $\gamma = \sqrt{(S_{2o} - S_{o2})^2 + 4S_{11}^2}$ 。

3)计算总共7个参数值,包括 $\{\varepsilon S_{00}, 2\sigma \sqrt{S_{10}^2 + S_{01}^2}, \lambda, -\lambda, 2^{1/2}(\gamma - \lambda), \gamma\}$ 其中 ε 为平坦型的尺度参数,可以在(0,1)根据具体情况选取^[10],其分别代表了平坦型(Flat)、坡型(Slop)、暗点型(Dark Blob)、明点型(Light Blob)、暗线型(Dark Line)、明线型(Light Line)和鞍型

(Saddle)^[11],通过比较这些参数的大小,选择最大的类型来描述该点的纹理特征,并利用特定的颜色来标定,如图1所示。

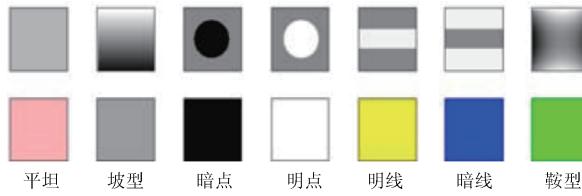


图1 BIF算法各特征的响应和标签对应图

Fig. 1 Response of each feature using BIF algorithm and label correspondences

对于实际图像,首先对彩色图像进行灰度化处理,然后利用上述方法。下述实例中,高斯滤波器方差 $\sigma=1$,由于只需要选取纹理特征所以并不需要提取平坦型特征(实验结果说明增加参数 ε ,会降低分类性能),于是令平坦型尺度参数 $\varepsilon=0$ 。经过分类后,利用预先选定的颜色来着色可以得到特征图^[12]。

为了进行进一步的分类和预测,对于特征选取需要重点考虑特异性和统一性,并在两者中达到最佳的平衡^[13]。为了达到上述这个目的,可以适当选取高斯滤波器的方差参数,该值越大分类结果越偏向统一性,反之亦然,如图2所示。于是对于高斯滤波器的方差参数选取一个基本值 σ_b ,该值需要使分类达到最佳的特异性。再利用它的3种倍数 $2\sigma_b$ 、 $4\sigma_b$ 和 $8\sigma_b$ 来获得分类的统一性^[14]。

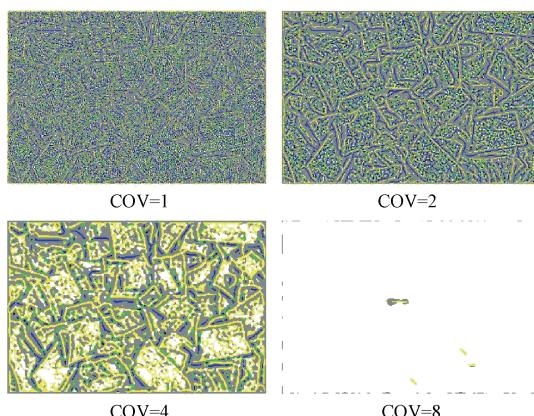


图2 各种高斯滤波器的方差下纹理分类结果

Fig. 2 Results of texture classification with Gauss filters in different variances

将提取出的6种特征(除去平坦型特征),结合4种不同的方差参数,可以得到每个像素点的基本图像特征向量^[15],总共 $6^4=1296$ 项,本文目标即为利用FPGA快速提取出该向量。

2.2 高斯导数卷积核

由于离散化系统的特点,所以不可以直接应用连续的函数表示,需要对卷积核进行适当的选取^[16]。本文提出如下方法。

1)对于二维高斯导数 $G(x,y)$,首先计算出其实域范围内的绝对积分值即 $G_{int}=\int_{-\infty}^{\infty} |G(x,y)| dx dy$,如表1所示。

表1 二维高斯导数绝对积分值

Table 1 The absolute integral value of the two-dimensional Gauss derivative

| 函数 | G_{00} | G_{10}/G_{01} | G_{11} | G_{20}/G_{02} |
|-----------|--------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| G_{int} | $1/\sigma^2$ | $\sqrt{2/\pi}/\sigma$ | $\frac{2}{\pi}/\sigma^2$ | $2\sqrt{\frac{2}{e\pi}}/\sigma^2$ |

2)由于 $\lim_{x,y \rightarrow \infty} G(x,y) = 0$ 并且函数的主要部分全部集中在零点附近,所以可以利用一定范围内,高斯函数与X-Y坐标平面所围体积和总体积的比值来控制误差,确定允许的误差比例值 $\epsilon\gamma\gamma$,根据误差要求计算出需要采样的取值范围 $(-\alpha, \alpha)$,使得函数满足 $\iint_{-a}^a |G(x,y)| dx dy \geq (1 - err) * G_{int}, a > 0, 0 < err < 1$;其中,令 $err = 1\%$ 可得函数范围,如表2所示。

表2 各函数的取值范围($err = 1\%$)

Table 2 The value of a in different functions ($err = 1\%$)

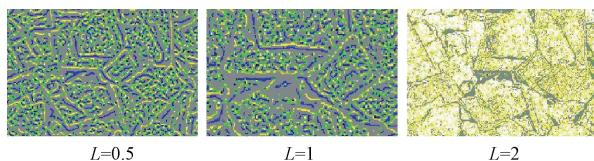
| 函数 | G_{00} | G_{10}/G_{01} | G_{11} | G_{20}/G_{02} |
|-----|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| a | 2.806σ | 3.103σ | 3.254σ | 3.378σ |

3)确定卷积核的尺寸 $S \times S$ (S 为奇数, $S \geq 3$),以及采样的步进长度 L ,设 $s_h = \left\lfloor \frac{s}{2} \right\rfloor$,使之满足 $s_h * L \geq \max(a)$ (例 $err = 1\%$, $\sigma = 1$, $L = 1$ 时 $\max(a) = 3.378$,所以卷积核最小为 9×9 结构)。

4)得到离散抽样结果 $K_s(m,n) = G(m * L, n * L)$ 。

5)计算比例参数 $U = \frac{G_{int}}{\sum |K_s(m,n)|} * \sigma^{i+j}$,将结果归一化得到 $K(m,n) = U * K_s(m,n)$, $-S_h \leq m, n \leq S_h$,从而得到离散高斯导数卷积核。

从理论上而言,系统应当使卷积核尺寸 $S \rightarrow \infty$ 且采样步长 $L \rightarrow \infty$,但是由于FPGA的资源有限,需要适当选取参数 S 与 L ,从而达到分类性能和资源利用率的平衡。从上文叙述的方法1)~3)中,说明了可以由确定一种误差项来控制卷积核尺寸,同时对于步长 L 的控制,在尺寸 S 足够大时,选取最佳值,如图3所示。

图3 不同步长条件下的特征($S = 23$ & $\sigma = 1$)Fig. 3 Characteristics image under different step size
($S = 23$ & $\sigma = 1$)

2.3 定点位宽的选取和误差控制

对于FPGA而言,运算使用的数值类型的选取十分重要,如果使用常用的浮点类型,需要占用大量的内部资源,同时具有可用频率低,延迟高等缺点。现在大多数FPGA中都集成了大量的高速整数乘法器,如果使用定点方式,就可以充分使用这些乘法器从而达到频率的最大化和资源占用率低等优点。例如对于Altera Cyclone EP4CE115F23I7 FPGA,32位浮点和定点的资源利用率为表3所示。

表3 浮点与定点资源占用和速度比较表

Table 3 Comparison of the resources occupancy and speed between floating point and fixed point

| 数值类型 | LE | 乘法器 | 频率/MHz |
|------|-------|-----|--------|
| 定点 | 16 | 4 | 350 |
| 浮点 | 3 495 | 7 | 14.7 |

但是同等位宽下,定点的表示范围和精度有限,如果选取不好,将可能造成数据溢出或者不可控的误差,所以本文将从算法的最大值与误差两方面进行分析,从而获得最佳的整数部分与小数部分。

2.3.1 算法最大值分析

由于定点的表示范围取决于整数部分的位宽,所以为了避免数值溢出造成错误,首先确定算法中各变量所涉及的绝对最大值,于是本文提出如下方法。

1) 计算卷积核的绝对最大值即 $K_{\max}^{i,j} = \max(|K^{i,j}(m,n)|) = U^{i,j} * \max(|G^{i,j}(x,y)|) < G_{int}^{i,j} * \sigma^{i+j}$

2) 得出中间量的最大值即 $\lambda_{\max} = 2K_{\max}^{2,0}$ 和 $\gamma_{\max} = 2\sqrt{K_{\max}^{1,12} + K_{\max}^{2,02}}$ 。

3) 结合步骤1、2)的结果,计算出算法的绝对最大值 $BIF_{\max} = \max(\{\max(K_{\max}^{i,j}), K_{\max}^{0,0}, 2\sqrt{2}K_{\max}^{1,0}, \lambda_{\max}, 2^{-1/2}(\lambda_{\max} + \gamma_{\max}), \gamma_{\max}\})$ 为了方便计算,结合步骤1中结果,假设 $K_{\max}^{i,j} = G_{int}^{i,j} * \sigma^{i+j}$,可以利用上文所述的结果计算得出:

$$BIF_{\max} = \max\left(\left\{1, 1, \frac{4}{\sqrt{\pi}}, 4\sqrt{\frac{2}{e\pi}}\right\}\right)$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{2} \sqrt{\frac{4}{\pi^2} + \frac{8}{e\pi}} + 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{2}{e\pi}}, 2\sqrt{\frac{4}{\pi^2} + \frac{8}{e\pi}}\} = \\ & \sqrt{2\left(\frac{4}{\pi^2} + \frac{8}{e\pi}\right)} + \frac{4}{\sqrt{e\pi}} \approx 3.007 \end{aligned}$$

4) 确定灰度图像的数据范围 $[0, h]$,从而得出定点的整数位宽即 $Int = |\log_2(BIF_{\max} * h)|$ (例如当 $h = 255$ 时,利用步骤3)中近似结果得到 $Int = 10$);

2.3.2 算法误差分析

定点的小数部分的位宽 $Frac$ 决定数值表示的精度,进而影响算法的误差。为了定量的分析这种误差,本文采用了如下误差函数: $Erf(\varepsilon) = \max(|f(x+\varepsilon) - f(x)|, -\infty < x < \infty)$, 其中 $\varepsilon = \frac{2}{2^{Frac}}$ 表示单位量化误差,通过计算各操作的 $Erf(\varepsilon)$,得出 $\text{Max}(Erf(\varepsilon))$ 。于是依据算法步骤,分为三部分计算数值误差。

1) 高斯导数滤波器的误差: $Erf_k i, j = K_{\max}^{i,j} * h * \varepsilon \leq h\varepsilon$ 。

2) 计算两个中间量的误差: $Erf_\lambda = 2erf_k 2, 0$ 和 $Erf_\gamma = 2\sqrt{erf_k 2, 0^2 + erf_k 1, 1^2}$ 。

3) 结合上述步骤的结果,计算最终的分类函数误差: $Erf_{\max} = \max(\{\max(Erf_k i, j), \varepsilon Erf_k 0, 0, 2\sqrt{2} Erf_k 1, 0, Erf_\lambda, Erf_\gamma, 2^{-1/2}(Erf_\lambda + Erf_\gamma)\})$ 如果假设 $Erf_k i, j = h * \varepsilon$, 可以得出系统误差的最大值 $Erf_{\max} \leq (2 + 2\sqrt{2})h * \varepsilon$ 。

依据本文给出的误差计算方法,按照前文算法最大值分析中的条件,为了FPGA实现方便,设 $Frac = 22$, ($Int + Frac$) = 32, 可以得到系统的误差为 $Erf_{\max} \approx 0.0002$, 在该误差条件下,实际的算法结果与精确结果几乎一致,如图4所示。

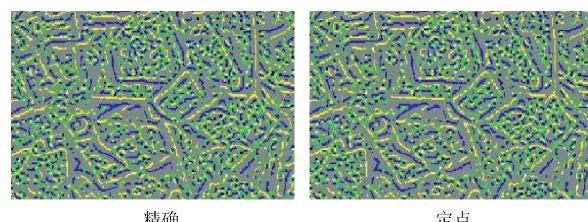


图4 定点计算结果与精确结果比较

Fig. 4 Comparison between exact results and calculation results with fixed points

3 系统设计与实现

3.1 总体设计

对于FPGA开发而言,首先需要从总体角度设计基本框架结构。为了在FPGA上实现基本图像特征的提取

并且达到优秀的性能与交互能力,本文将设计总体上分为 5 大部分,系统各部分的组成与连接形式,如图 5 所示。

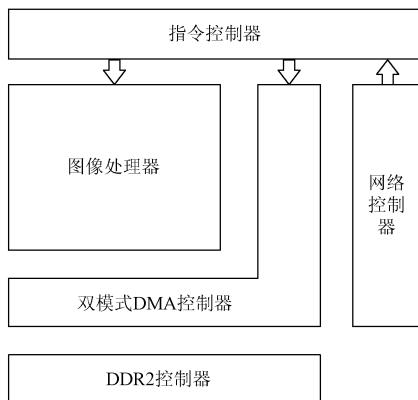


图 5 总体设计框图

Fig. 5 Block diagram of overall design

其中内存访问采用内存模式,即利用读写使能、地址与数据信号来完成的访问模式。但是由于图像是一组连续、方向单一且数量巨大的数据,所以本文采用了流模式的方案,即利用包起始、包结束、包有效和数据信号来访问,达到最大的读写速度。

系统通过利用以太网接收图像数据,再根据命令完成对图像数据的暂存、算法处理以及回传等操作,从而达到硬件上实现基本图像特征算法。

3.2 实现与测试

将各模块进行组合,并加入相应的时钟域转换模块、复位控制模块等,完成系统的总体实现。同时利用 C# 编写的上位机进行实际测试。本设计利用 Altera 公司提供的 QSYS 工具,进行模块连接,构成整体系统。为了方便系统的实现与调试,利用 C# 语言在.NET 环境下编写了上位机软件。

对于常规的图像而言,通常只用关心其纹理特征,所以将平坦度参数 $FlatE$ 设置为 0 同时考虑到噪声影响将 Cov 设为大于 1 的值,本文设置为 1.4,其运行结果如图 6

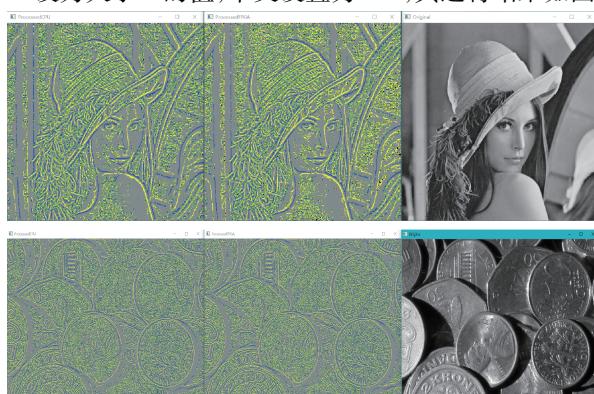


图 6 常规图像($FlatE = 0$)的运行结果

Fig. 6 Operation results of conventional image ($FlatE = 0$)

所示。而对于文本图像的特征提取,为了提高分类效果,则需要考虑其平坦背景影响,所以本文将 $FlatE$ 设为 0.1,其运行结果如图 7 所示。

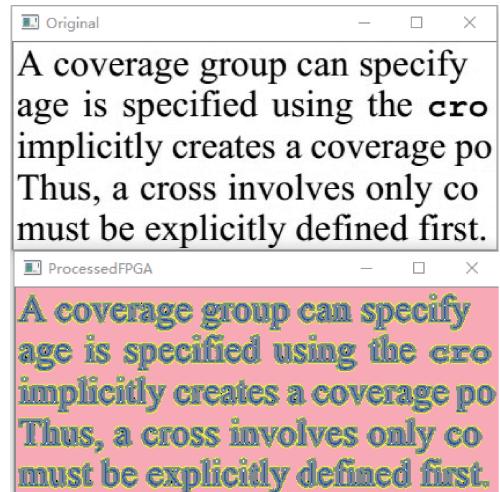


图 7 文字图像($FlatE = 0.1$)的运行结果

Fig. 7 Operation results of text images ($FlatE = 0.1$)

为了进行性能的对比实验,本文在 PC 也实现了相应的 BIF 算法,并且利用性能计数器准确计算运行时间,PC 实验平台的参数如表 4 所示,CPU 采用了四核心八线程同时支持 AVX 超标量指令集。

表 4 PC 平台参数表

Table 4 Parameters of PC platform

| | |
|-----------|---|
| CPU | Intel Core i7 3615QM @ 2.3 GHz (3.3 GHz Max) AVX 指令集 |
| RAM | 2 x DDR3 4GB @ 1600 MHz |
| 平台功耗(TDP) | 45 W |

性能实验结果,如表 5 所示。由于本文采用的是 Cyclone 系列的低端 FPGA,其本身工艺与性能很低,导致 FPGA 平台的运行性能约为 CPU 平台的 2.7%,但是 FPGA 的功耗只有 100 mW,其性能功耗比是 CPU 的 12 倍,其中令 T_c 为 CPU 运行时间, T_f 为 FPGA 运行时间, E_c 为 CPU 功耗, E_f 为 FPGA 功耗,性能比 $P = \frac{T_c}{T_f}$,性能功耗比 $EP = \frac{E_c}{E_f}$ 。

表 5 运行性能与功耗对比表

Table 5 Comparison of running performance and power consumption

| 图像尺寸 | CPU 运行时间/ ms | FPGA 运行时间/ ms | CPU | FPGA | 性能比 P | 性能功耗比 EP |
|-------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|-------|----------|
| | | | 功耗 E_c/W | 功耗 E_f/W | | |
| 512 × 512 | 228 | 8 388 | 45 | 0.1 | 2.7% | 12.15 |
| 1 440 × 380 | 455 | 17 510 | 45 | 0.1 | 2.6% | 11.7 |
| 768 × 512 | 339 | 12 582 | 45 | 0.1 | 2.7% | 12.15 |

图 6 常规图像($FlatE = 0$)的运行结果

Fig. 6 Operation results of conventional image ($FlatE = 0$)

$$\text{功耗比 } EP = \frac{E_c}{E_f} * P。$$

由表5可知,如果在相同成本、制造工艺和功耗条件下,FPGA的性能会远高于同类的CPU系统。

为了测试系统在含有噪声情况下的运行状况,将图6中Lena的原始图像中加入10%的高斯噪声(乘积),其运行结果如图8所示,可见系统具有很高的鲁棒性。

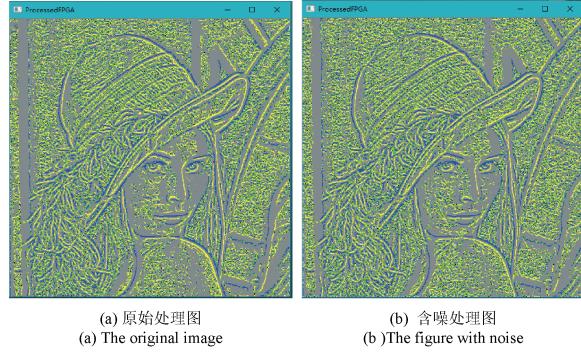


图8 加入高斯噪声后的运行结果

Fig.8 Operation results after added Gauss noise

4 结 论

本文为了提高目前图像纹理分类系统的性能,创新地提出了一种在FPGA平台下实现纹理特征提取的目标。本文在数学理论上对基本图像特征算法做了并行化的优化,同时从算法的数值范围和表示精度两个角度,做了相应的分析和误差控制,从而适应FPGA的运行。对于FPGA的内部设计,本文采用顶层到底层的设计流程,首先对系统的整体架构做了分析,并对数据流传输给出了一个高效率的解决办法。其次对其中的主要模块采用了流水线优化,同时采用寄存器配置模式,从而在线地修改参数,适应不同的图像大小和卷积核等环境变量。实际系统获得了十分出色的性能功耗比,在同等功耗条件下,可以达到十倍于CPU的性能,达到了快速提取特征的目的。

参考文献

- [1] 史静,朱虹,邢楠,等.一种多尺度时频纹理特征融合的场景分类算法[J].仪器仪表学报,2016,37(10):2333-2339.
SHI J, ZHU H, XING N, et al. Multi scale time frequency texture feature fusion algorithm for scene classification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2333-2339.
- [2] CROSIER M, GRIFFIN L D. Using basic image features for texture classification [J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 88 (3):447-460.
- [3] BROADHURST R E. Statistical estimation of histogram variation for texture classification[C]. Proceedings of the Fourth International Workshop on Texture Analysis and Synthesis, 2005:25-30.
- [4] 林森,张俊宇,郭金玉,等.局部方向模式在非接触掌纹识别中的应用[J].仪器仪表学报,2015,36(1):201-208.
LING S, ZHANG J Y, GUO J Y, et al. Application of local directional pattern in non-contact palmprint recognition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (1):201-208.
- [5] VARMA M, GARG R. Locally invariant fractal features for statistical texture classification [C]. IEEE 11th International Conference on Computer Vision, 2007.
- [6] 胡敏,陈红波,谢成军,等.基于颜色和纹理特征的病害识别算法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(7):970-977.
HU M, CHEN H B, XIE CH J. Cucumber disease recognition algorithm based on color and texture features[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 970-977.
- [7] 周志娟,张玉贵,樊奔.基于FPGA的干涉信号ADC采集系统设计[J].电子测量技术,2016,39(12):136-139.
ZHOU ZH J, ZHANG Y G, FAN B. Design of interference signal double ADC acquisition system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(12): 136-139.
- [8] VARMA M, ZISSERMAN A. A statistical approach to material classification using image patch exemplars[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009,31(11): 2032-2047.
- [9] 金铭,汪友生,边航.一种多特征融合的图像检索新方法[J].电子测量技术,2016,39(8):85-89.
JIN M, WANG Y SH, BIAN H. New image retrieval method based on multi feature integration[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 85-89.
- [10] 尹艳鹏,周颖,曾丹,等.基于多特征融合条件随机场的人脸图像分割[J].电子测量技术,2015,38(6):54-59.
YIN Y P, ZHOU Y, ZENG D, et al. Face segmentation using CRFs based on multiple feature fusion [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38 (6): 54-59.
- [11] LAKOVIDIS D K, MAROULIS D E, BARIAMIS D G. FPGA architecture for fast parallel computation of co-occurrence matrices [J]. Microprocessors &

- Microsystems, 2007, 31 (2):160-165.
- [12] 何雯, 董威. 基于 FPGA 的高速视频采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5): 83-87.
HE W, DONG W. Design of high-speed video acquisition system based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(5): 83-87.
- [13] 徐伟, 裴晓芳, 季鑫源, 等. 高精度多通道自动气象站气压检定仪的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(2): 34-38.
XU W, PEI X F, JI X Y, et al. Design of multi-channel air pressure calibrators of high-precision for automatic meteorological station [J]. Journal of Instrument Technique and Sensor, 2016(2): 34-38.
- [14] 刘娟, 胡敏, 黄忠. 基于最优支持度的证据融合表情识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 714-721.
LIU J, HU M, HUANG ZH. Expression recognition method based on evidence fusion of optimal supportability[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(5): 714-721.
- [15] 徐斌, 裴晓芳, 李太云. 穿戴式智能计步器设计[J]. 电子科技, 2016(3):178-182.
XU B, PEI X F, LI T Y. Design of wearable smart pedometer [J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2016(3): 178-182.
- [16] MAROULIS D, LAKOVIDIS D K, BARIAMIS D. FPGA-based system for real-time video texture analysis[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2008, 53 (3):419-433.

作者简介



裴晓芳(通讯作者),1978年出生,分别在2000年、2003年于南京信息工程大学获得学士学位和硕士学位,现为南京信息工程大学副教授,主要研究方向为信号处理与应用。

E-mail: xiaofangpei@163.com

Pei Xiaofang (Corresponding author) was born in 1978. She received B. Sc. and M. Sc. both from Nanjing University of Information Science and Technology in 2000 and 2003, respectively. Now she is an associate professor in Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research interests focus on information processing and application.



王洁,2016年于宿迁学院获得学士学位,现于南京信息工程大学攻读研究生,主要研究方向为信号处理与应用。

E-mail: 13228711797@163.com

Wang Jie received B. Sc. from Suqian College in 2016. Now she is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research interest focuses on information processing and application