

面向指纹图像增强的 Gabor 滤波器设计

刘俊宝, 李 毅, 韩 军, 曾晓洋

(复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 201203)

摘 要: 提出一种适用于指纹图像增强的 Gabor 滤波器的硬件设计与实现方案。利用更精确的方向与频率信息配置滤波器改善指纹图像的增强效果。为解决由此带来的带宽问题, 设计输入输出缓存器, 最多可使带宽降低近 10/11。整个设计采用 SMIC 0.13 μm 工艺综合后大小约为 24 万等效门, 频率为 250 MHz。在滤波器窗口大小为 11×11 时, 引入流水线结构使吞吐率可以达到每秒 200 万像素以上。实验结果表明, 该方案具有较好的实时性。

关键词: 指纹; 图像增强; Gabor 滤波器; 输入输出缓存器; 流水线结构

Design of Gabor Filter for Fingerprint Image Enhancement

LIU Jun-bao, LI Yi, HAN Jun, ZENG Xiao-yang

(State Key Laboratory of ASIC and System, Fudan University, Shanghai 201203, China)

【Abstract】 This paper proposes a design and implementation scheme of Gabor filter for fingerprint image enhancement. It employs accurate local orientation and frequency to achieve better enhancement effect. To address the subsequent problem of bandwidth increase, a specific Input/Output(I/O) buffer is designed, which can almost cut off 10/11 bandwidth. At SMIC 0.13 μm technology, the equivalent gate count is 240 000, while the frequency is 250 MHz. Due to the introduction of pipeline, the design scheme can achieve a throughput more than 2 Mpixels/s, when convolution kernel size is 11×11 . Experimental result shows that the scheme can well satisfy the requirements of the real-time applications.

【Key words】 fingerprint; image enhancement; Gabor filter; Input/Output(I/O) buffer; pipeline structure

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.18.035

1 概述

指纹识别作为一种重要的生物识别技术, 具有广泛的应用^[1-3]。指纹识别质量的指标除了识别率与误识率, 识别速度也非常重要, 但这 2 项指标往往是互相矛盾的。特别是在嵌入式应用中, 如何用有限的资源在最大化的同时满足这些指标, 目前研究还很少。基于细节点的方式是指纹识别领域最主流的方式。一般情况下, 新采集的指纹图像质量参差不齐, 因此, 在提取细节点前, 指纹图像增强是至关重要的一个步骤, 会极大地影响识别效果。图像增强计算量非常庞大, 由此带来的时间消耗会使实时性得不到满足。

文献[4-6]提出的硬件加速方案都有一个缺点, 即为了减小硬件设计的复杂度, 对文献[7]中的算法进行了过度的简化, 从而不能取得好的图像增强效果。首先方向与频率信息的精度太低。文献[4]中方向只有 8 个选择, 而频率被固定在 1/6, 因此, 总共可以配置出 8 个 Gabor 滤波器。而文献[6]利用查表计算三角函数, 除了精度低, 面积也大。事实上, 在指纹图像的不同区域, 方向差异性很大, 因此, 低精度会损害图像增强的质量, 进而降低识别效

果。文献[4-5]的滤波器大小分别是 3×3 和 5×5 。窗口太小不能够很好地抑制噪声和抗干扰。另外, 窗口尺寸固定会限制适用的输入图像的分辨率。

Gabor 滤波环节大约占到图像增强所有步骤中的 83%^[7], 因此, 为 Gabor 滤波设计专门的硬件加速单元即能以最小的代价同时解决精度和时间开销问题。而其余增强步骤, 如规格化、求方向、频率和掩膜, 则由处理器完成。本文设计中输入输出缓存器和流水线的引入很好地解决了带宽和吞吐率的问题, 另外, 图像和滤波器尺寸都可配置。图像最大支持 $1\,024 \times 1\,024$ 像素, 而滤波器尺寸则有 5 个选择: 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 , 11×11 , 提高了灵活性。而且 Gabor 滤波器会根据图像每个点自动配置方向和频率。流水 CORDIC 单元也进一步保证了三角函数的计算精度。

2 Gabor 滤波器

Gabor 滤波器经常被用在各种生物识别相关的领域。它同时兼具方向与频率选择性^[7], 可以很好地滤除噪声干扰, 保持并重建指纹图像的脊线特征。Gabor 滤波器的表达式如下:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61176023)

作者简介: 刘俊宝(1987—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 图形图像处理, 模式识别; 李 毅, 博士研究生; 韩 军, 助理研究员; 曾晓洋, 教授

收稿日期: 2011-12-12 **修回日期:** 2012-01-12 **E-mail:** 09212020032@fudan.edu.cn

$$h(u, v; \phi, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{u_\phi^2}{\delta_u^2} + \frac{v_\phi^2}{\delta_v^2} \right] \right\} \cos(2\pi f u_\phi)$$

$$u_\phi = u \cos \phi + v \sin \phi$$

$$v_\phi = -u \sin \phi + v \cos \phi \quad (1)$$

其中, ϕ 和 f 分别表示脊线方向跟频率; δ_u 和 δ_v 则分别是高斯函数在 u 和 v 轴的空间常数, 它们都被设为 4; 三角函数在本文中采用流水线的 CORDIC 方式实现。为方便计算并提高存储器的利用率, 用 $[-1, 1]$ 表示 $[-\pi, \pi]$ 。在考虑缩短关键路径后, 式(1)可以改写为:

$$h(u, v; \phi, f) = \exp \left\{ -\frac{1}{32} r^2 \right\} \cos(2l)$$

$$l = (fu) \cos \phi + (fv) \sin \phi$$

$$r^2 = u^2 + v^2 \quad (2)$$

设 $G(i, j)$ 为规格化后的指纹图像, $O(i, j)$ 和 $F(i, j)$ 分别是方向和频率图像, $R(i, j)$ 是可恢复掩膜。那么增强后的指纹图像可以表示为:

$$E(i, j) = \begin{cases} 255 & \text{if } R(i, j) = 0 \\ \sum_{u=-W_g/2}^{W_g/2} \sum_{v=-W_g/2}^{W_g/2} h(u, v; O(i, j), F(i, j)) G(i-u, j-v) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

3 Gabor 滤波器的硬件设计

本文的指纹识别系统如图 1 所示, 包括中央处理器、存储器、总线和 Gabor 滤波硬件加速单元。由于 Gabor 滤波延时的关系, 因此专门为其设计了硬件加速单元。此外, 其他步骤全部由处理器完成, 如规格化、求方向和频率、细化和匹配。而中间数据放在存储器中。

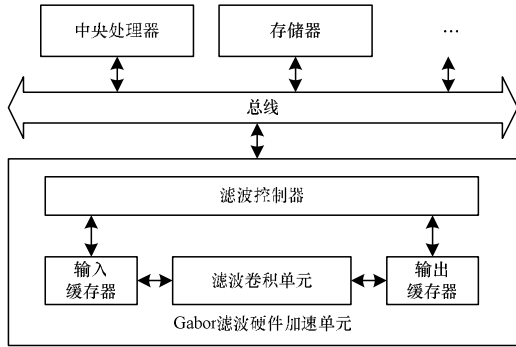


图 1 SoC 中的 Gabor 滤波加速单元

3.1 输入输出缓存器

由于本文设计中针对每个像素点都采用其相应的高精度的方向和频率信息来配置 G 滤波器, 而且窗口最大可达到 11×11 , 因此必须考虑由此带来的带宽问题。但由于有很多数据可以复用, 因此只要设计专门的缓存机制就可使带宽得到大幅下降。假设窗口大小为 $w \times w$ 。如图 2(a) 左面所示, 当滤波窗口向右移动时, 相邻窗口有 $w-1 \times w$ 的输入图像信息是重叠的, 重叠区域为阴影部分。因此, 通常的图像处理硬件实现时都会缓存这些信息。但是还需要注意, 当窗口移动到下一行时, 如图中阴影区域所示, 这些数据也会重复用到。如果不特殊处理, 当 w 为 11 时,

除图像边缘以外, 所有点都要读入滤波器 11 次。

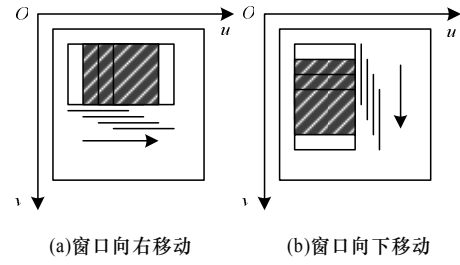


图 2 数据复用

为了利用这一特点, 在加速器中加入了 $w+1$ 行的缓存区, 宽度为 1 024。图 3 以 $w=5$ 为例描述了使用方法。在前 5 行可用时, 窗口对第 2 行从左至右进行滤波, 而第 5 行继续读入图像。当第 2 行滤波结束后, 第 5 行数据也已经准备好, 则可以使用缓存器中第 0 行写入图像的第 6 行, 其他 5 行做滤波。按照这个模式, 6 行滤波器依次在图像中走 Z 字型读入图像并滤波。采用这种策略每个像素点只需要读入一次即可。当 $w=11$ 时, 读入数据量可以减少约 10/11。

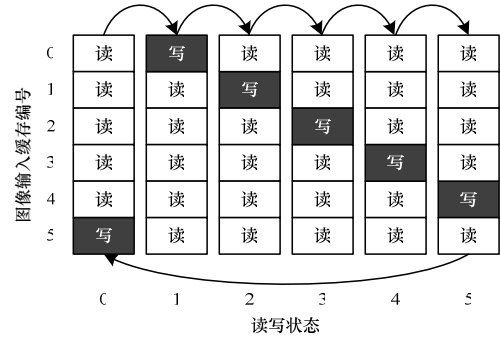


图 3 图像输入缓存器操作示意图

此外, 方向、频率、掩膜信息及输出图像都使用 2 行缓存区, 当一行读入时, 另一行写出。

3.2 流水线设计

为了提高吞吐率, 设计中所有的计算单元都采用了流水设计。其中最重要的是三角函数的计算, 本文采用 CORDIC 算法^[8-9], 其实现如图 4 所示。

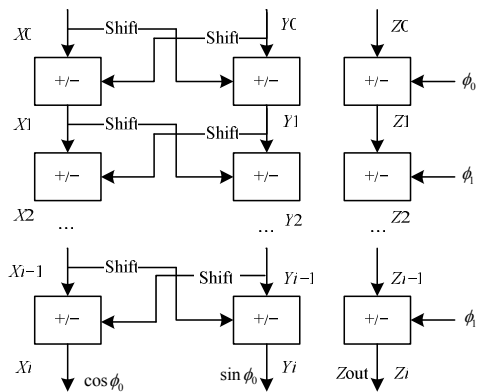


图 4 CORDIC 算法实现

该算法只需要移位与加法操作即可在多次迭代后逼近精确的三角函数值。输入方向的范围为 $[-\pi, \pi]$, 占 11 bit。

首先把角度调整到 $[-1/2, 1/2]\pi$ 。然后采用图 4 所示的结构进行迭代。当 Z 趋近 0 时, X 和 Y 也分别趋近余弦和正弦值。本文中迭代级数为 11, 在加上之前 2 级调整范围的操作, 共需要 13 个周期计算出结果。

图 5 是 Gabor 滤波卷积单元的实现示意图, 其中, 指数函数因为取值很有限, 本文采用查表的方式实现。另外,

频率范围为 $[1/3, 1/15]$, 占 10 bit。 R 控制图 5 中的累加器, 包括累加、保持和清零 3 个状态。保持是由于流水中断需要, 而清零则是写回结果并开始新一轮卷积。另外一个重要的模块是图 1 中的控制器, 它有三方面的作用。首先是与总线时序相关的管理, 其次是全局起始控制, 最后是缓存器读写状态的控制。

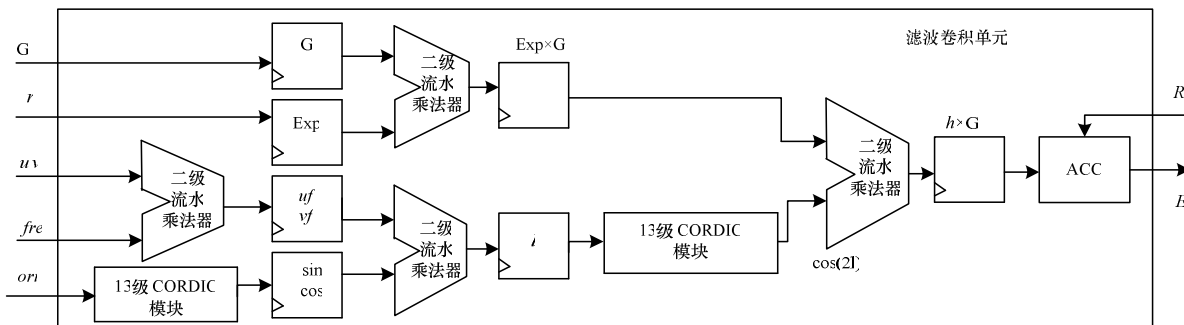


图 5 Gabor 滤波卷积单元的实现

4 实验结果与分析

本文用 Verilog HDL 实现了 Gabor 滤波加速器, 并用 Synopsys 的 Design Compiler 进行综合, 采用 SMIC 0.13 μm 的工艺。综合后面积大约为 24 万等效门。而频率最大可以达到 250 MHz, 在该频率下, 应用本文提出的方式对一幅 256×256 像素的指纹图像进行 Gabor 滤波的时间最多为 31.7 ms。指纹图像中不可恢复区域, 即 $R(i,j)=0$ 的区域, 不用做滤波卷积, 实际耗时大大缩短。在仿真时不同窗口大小对应的吞吐率如表 1 所示, 其中频率为 250 MHz。从这些数据可以看出, 本文设计增强一幅图像所需要的时间远小于 1 s, 可以很好地满足实时性的需求。

表 1 窗口大小不同时的吞吐率

窗口大小	吞吐率/(Mpixel·s ⁻¹)
3×3	27.8
5×5	10.0
7×7	5.1
9×9	3.1
11×11	2.1

图 6 是增强前后的指纹图像。



图 6 增强前后的指纹图像

可以看出增强后指纹脊线非常清晰, 噪声干扰得到了很好的抑制, 优于文献[5]中的图 6, 也优于文献[6]中给出的结果。其中一个区别表现在脊线由噪声导致的错误中断可以得到很好的恢复, 这样可以有效避免后续细化和提取

特征点的操作中引入错误的特征点。

5 结束语

本文提出一种适用于指纹图像增强的 Gabor 滤波器的硬件设计与实现方案, 并且给出了综合后的结果。可以看出, 相比其他设计, 本文设计在满足实时性要求的前提下能够达到更好的增强效果, 适用于对识别效果要求较高的嵌入式应用场合。

参考文献

- [1] 刘欢喜. 人体生物特征的综合分析与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [2] 何 军. 指纹识别技术的研究与应用[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2004.
- [3] 沙亚清, 孙宏伟, 顾 明. 基于智能卡和指纹识别的电子报税认证系统[J]. 计算机工程, 2006, 32(14): 133-135.
- [4] Razak H A, Taharim R H. Implementing Gabor Filter for Fingerprint Recognition Using Verilog HDL[C]//Proc. of International Colloquium on Signal Processing & Its Applications. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 423-427.
- [5] Lopez M, Canto E, Fons M. Hardware-software Co-design of a Fingerprint Image Enhancement Algorithm[C]//Proc. of the 32th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 1257-1262.
- [6] 周永东. 指纹图像增强算法研究和加速器设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] Lin Hong, Jain A. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789.
- [8] Considine V. CORDIC Trigonometric Function Generator for DSP[C]//Proc. of ICASSP'89. Glasgow, UK: [s. n.], 1989: 2381-2384.
- [9] 杨 宏, 李国辉, 刘立新. 基于 FPGA 的 CORDIC 算法的实现[J]. 西安邮电学院学报, 2008, 13(1): 75-77.

编辑 张正兴