

Bilateral Filter Algorithm of Vein Image Based on FPGA

Yueqing Liang, Xiaoyu Cui*

Sino-Dutch Biomedical and Information Engineering School, Northeastern University, Shenyang Liaoning
Email: liang-yue-qing@163.com, *cuixy@bmie.neu.edu.cn

Received: Jun. 12nd, 2019; accepted: Jun. 29th, 2019; published: Jul. 5th, 2019

Abstract

The bilateral filter algorithm reduces noise in hand vein image while preserving edge details of vein. By implementing the bilateral filter algorithm on FPGA, features of FPGA such as parallel and pipeline processing can boost the calculation speed of the algorithm. While satisfying the real-time requirements of hand vein imaging system, this implementation can enhance the hand vein image for subsequent segmentation and extraction of vein.

Keywords

Bilateral Filter, FPGA, Hand Vein, Image Processing

基于FPGA的静脉图像双边滤波算法

梁岳青, 崔笑宇*

东北大学, 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳
Email: liang-yue-qing@163.com, *cuixy@bmie.neu.edu.cn

收稿日期: 2019年6月12日; 录用日期: 2019年6月29日; 发布日期: 2019年7月5日

摘要

双边滤波算法在给手背静脉图像进行去噪、平滑的同时可以保持静脉血管的边缘细节。基于FPGA的双边滤波算法, 可以利用FPGA的并行和流水线计算的特点, 加快算法的计算速度, 在满足手背静脉显像系统对于实时性要求的同时, 增强手背静脉图像, 为后续的血管分割和提取奠定基础。

*通讯作者。

关键词

双边滤波, FPGA, 手背静脉, 图像处理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

皮下静脉穿刺是常见的医疗手段之一, 在静脉采血、输血、注射药物之前都需要对患者进行皮下静脉的穿刺。但是, 许多因素会影响到皮下静脉穿刺的成功率, 如儿童静脉纤细、深色皮肤等。手背静脉显像技术可以帮助医护人员找到血管, 提高皮下静脉穿刺的成功率。主流的手背静脉成像技术基于近红外成像技术, 利用了静脉血管中的血红蛋白对于 700 nm~900 nm 的近红外光的吸收率高于水、脂肪等周围的皮肤组织的特性[1]。由于光强、光照角度、手背皮肤散射、个体手背厚薄等因素, 静脉血管和周围的皮肤组织之间的分界不够明显, 图像的对比度较低且噪声较多。噪声会影响后续的血管分割提取, 导致静脉血管细节的模糊或缺失, 因此需要在保证图像中静脉血管的细节特征不受影响下对图像中的噪声进行滤除。现如今, 双边滤波由于其能够为图像去噪的同时保留图像的边缘信息而被越来越多地使用, 该方法非常适合于手背静脉图像的去噪处理。考虑到手背静脉显像的实时性要求较高, 双边滤波用软件实现比较慢, 因此采用硬件实现能达到更快的处理速度和显示效果。随着近年来芯片工艺的发展, FPGA 的性能不断提高, 使用成本大幅降低。用户可以根据需求使用软件设计出硬件逻辑, 并利用 FPGA 中集成的资源帮助图像采集及运算, 降低了开发难度。利用 FPGA 的并行以及流水线处理的特点, 可以有效地提高双边滤波算法的计算速度[2]。本文利用双边滤波的优点, 在 FPGA 上实现了双边滤波的算法, 能够有效地对手背静脉图像进行去噪, 提高手背静脉图像的清晰度。

2. 双边滤波算法

双边滤波是一种结合了空间邻近关系和亮度相似度的滤波器。空间邻近度滤波器通过平均滤波器窗口中心点邻域的像素值, 起到低通滤波器的作用, 对图像进行平滑。而亮度相似度滤波器只允许平均相似的像素值, 假如滤波器窗口内的像素与中心像素的像素值相差较大, 该像素则会被忽略, 起到保持边缘的作用。因此, 双边滤波器既平滑了图像, 又保持了图像的边缘。

双边滤波由下式定义:

$$\bar{\phi}(\bar{m}_0) = \frac{1}{k(m_0)} \sum_{m \in F} \phi(m) \cdot s(\phi(m_0), \phi(m)) \cdot c(m_0, m) \quad (1)$$

定义 $m = (x, y)$ 代表像素的坐标, $m_0 = (x_0, y_0)$ 和 $\bar{m}_0 = (\bar{x}_0, \bar{y}_0)$ 分别代表滤波前后中心像素的坐标。因此, 式中 $\bar{\phi}(\bar{m}_0)$ 为滤波后中心像素的像素值, $\phi(m)$ 和 $\phi(m_0)$ 分别为滤波窗口 F 中邻域像素和中心像素的像素值。

$$s(\phi(m_0), \phi(m)) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\|\phi(m_0) - \phi(m)\|}{\sigma_{ph}} \right)^2} \quad (2)$$

$$c(m_0, m) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\|m_0 - m\|}{\sigma_c} \right)^2} \quad (3)$$

式(2)和(3)分别称之为亮度相似度算子和空域邻近度算子[3]。式中, σ_{ph} 和 σ_c 定义了高斯曲线的宽度, 决定了双边滤波器的性能[4]。亮度相似度算子比较每个邻域像素与中心像素的灰度值, 基于 σ_{ph} 因子计算出相应权重系数。当像素值差值的绝对值越大, 相应的权重系数越小, 反之亦然。空域邻近度算子是一个低通滤波器, 其权重与中心像素与邻域像素的空间距离成反比。两种权重相结合, 每个像素由其邻近点的加权平均代替。

$$k(m_0) = \sum_{m \in F} S(\phi(m_0), \phi(m)) \cdot c(m_0, m) \quad (4)$$

式(4)对加权后的像素值进行归一化, 保证滤波后的图像灰度级保持在原来的范围。

3. 双边滤波算法的 FPGA 实现

3.1. 双边滤波处理步骤

双边滤波算法实现的总体框图如图 1 所示, 图像逐个像素从 SDRAM 中读入。为了形成 $N \times N$ 大小的窗口, 输入的像素需要先经过 $N - 1$ 个图像宽度的行缓存, 再逐列输出到 $N \times N$ 的窗口寄存器中。窗口寄存器中的每个像素点分别输入到各自的亮度相似度算子, 并行计算出亮度相似度权重系数, 并与已知的空域邻近度权重系数相乘。计算出权重系数后, 每个像素与相应权重系数相乘, 然后分别对加权像素值与权重系数求和, 二者相除得到双边滤波后的图像。

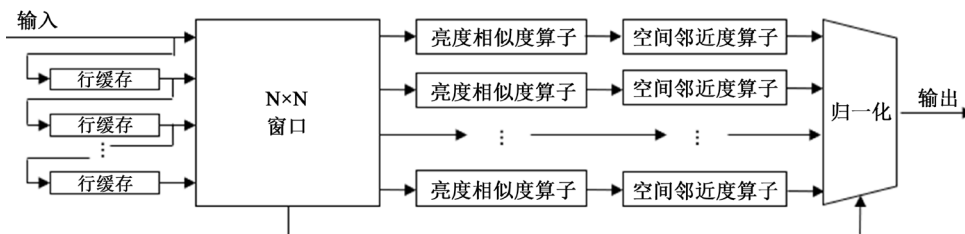


Figure 1. Flow chart of algorithm process
图 1. 算法处理步骤流程图

3.2. 亮度相似度权重系数计算

根据式(2), 计算亮度相似度权重系数需要复杂的指数运算。在 FPGA 中实现指数运算的常用函数有 CORDIC 算法、分段线性逼近法等, 然而其计算范围小、精度差, 而且需要耗费大量硬件资源和运算周期[5]。而查表法是根据精度要求计算出结果, 并将结果预先写入查找表(LUT)中, 然后在计算时通过查表在 1 个时钟周期可以直接得到结果。因此使用查表法查找权重系数预先的计算结果代替权重系数的直接计算, 可以有效地减少了资源的消耗和计算的时间。

根据式(2), 两个像素值的差值可以作为查找表中的相应权重系数的查找地址, 且权重系数的数量是有限的, 并受到下列三个参数的影响:

- 1) 像素值的位宽 N ;
- 2) 参数 σ_{ph} ;
- 3) 权重系数的位宽 W ;

提升图像的像素值位宽, 会导致像素值差值的数量增多, 预先存入查找表中的权重系数的数量会增加。参数 σ_{ph} 会决定高斯曲线的陡峭程度, 与权重系数的位宽共同影响计算精度。根据指数的性质, 亮度相似度权重与空间邻近度权重的取值范围为 $0 < s(\phi(m_0), \phi(m)) < 1$ 与 $0 < c(m_0, m) < 1$, 因此使用定点数代替浮点数来表示权重系数。当像素值差值越大, 负指数向零收敛, 此时只有有限数量的权重系数大于零。

在权重系数的位宽 W 下, 对权重系数采取四舍五入, 并将最后一个大于 0 的权重系数所对应的像素值差值定为极限值。假设像素值位宽 $N=8$, 像素值差值的可取 0~255, 权重系数总共有 256 个值, 查找表深度为 256, 权重系数位宽 $W=8$, 消耗 256×8 bit 的存储器资源。如图 2 所示, 此时像素值差值 90 为极限值, 只有 90 个权重系数会被存储到查找表, 消耗的存储器资源随之减少。

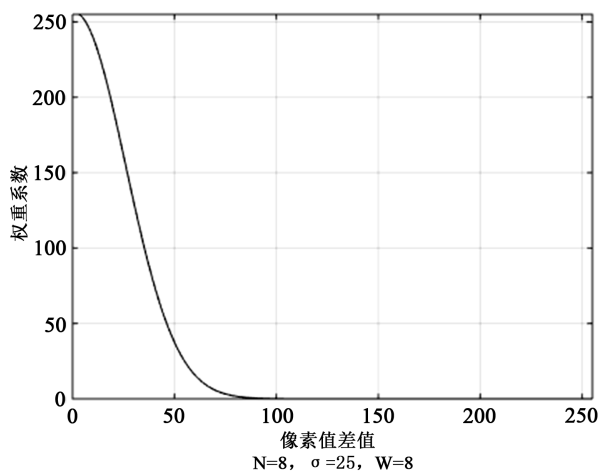


Figure 2. Limitation of the number of weight coefficient
图 2. 数量有限的权重系数

亮度相似度权重系数计算步骤如图 3 所示, 窗口寄存器中的邻域像素 $\phi(m)$ 中心像素 $\phi(m_0)$ 相减, 得到像素值差值来查找基于特定 σ_{ph} 计算出的亮度相似度权重系数表, 得到像素 m 对应的亮度相似度权重系数 $p(m)$ 。若像素值差值超过极限值, 将跳过查表, 输出结果 0。

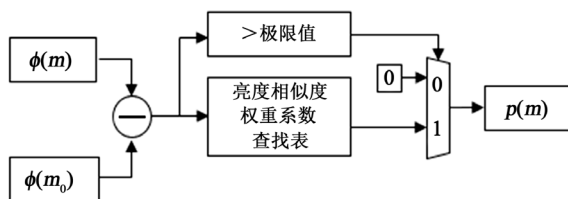


Figure 3. Brightness similarity operator
图 3. 亮度相似度算子

3.3. 空间邻近度权重系数计算

根据式(3), 计算空间邻近度权重系数与亮度相似度权重系数相似, 需要进行复杂的指数运算。空间邻近度权重系数对于特定大小的窗口是恒定的, 而且在水平和垂直方向上对称, 可预先计算好结果。如图 4 所示, 对于 3×3 大小的窗口, 只需计算空间距离为 0、1、2 的权重系数, 根据像素的空间位置直接查表可得相应的空间邻近度权重系数 $g(m)$, 并与上一步的亮度相似度权重系数相乘得到每个像素的综合权重系数 $w(m)$ 。

3.4. 归一化

根据式(1)和式(4), 加权后的像素值和权重系数分别需要进行累加, 二者相除进行归一化。如图 5 与图 6 所示, 采用累加树的形式对加权像素值和权重系数分别累加, 对于 3×3 大小的窗口, 需要消耗 4 个时钟周期得到累加结果, 最后二者相除得到双边滤波后的像素值。

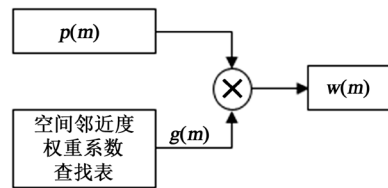


Figure 4. Spatial proximity operator
图 4. 空间邻近度算子

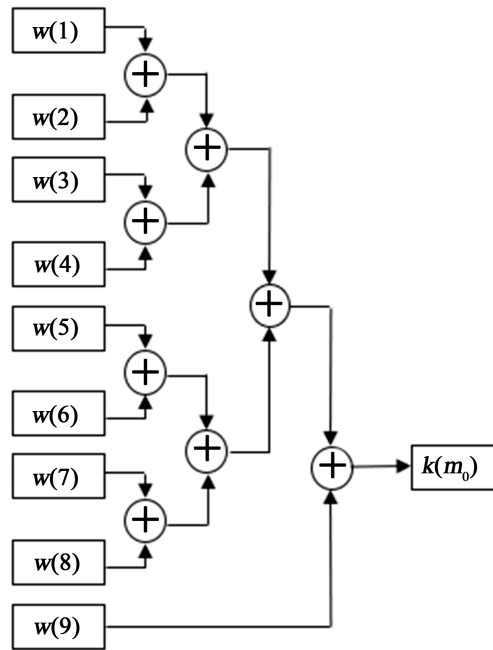


Figure 5. Add tree component
图 5. 累加树结构

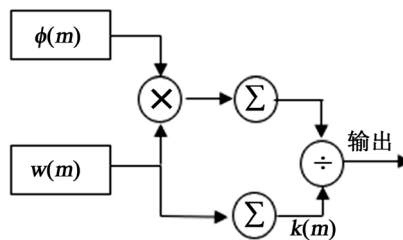


Figure 6. Normalization of weight pixel value
图 6. 加权像素值的归一化

4. 实验结果

采用 Intel Cyclone IV E 系列的 EP4CE22F17C8 芯片实现算法, 在 752×480 的图像分辨率, 及 5×5 窗口大小的参数下, 双边滤波模块总共消耗了 3038 个逻辑寄存器, 79440 位 RAM 存储资源, 及 72 个乘法器资源。使用 Matlab 对 8 位的 752×480 分辨率大小的手背静脉图像添加 $\sigma_{noise} = 0.5$ 的高斯噪声, 用 ModelSim 对图像进行双边滤波仿真, 双边滤波器中参数分别为: $\sigma_{ph} = 25$, $\sigma_c = 25$, $W = 8$, 另使用相同参数的高斯滤波对噪声图像进行处理作为比较。实验结果如图 7 所示, 经过双边滤波后图像得到平滑, 双边滤波的去噪效果良好, 且相较于高斯滤波这一常见的图像去噪方法, 保持了手背静脉血管的结构和

边缘。由于流水线设计的特点, 在 25 MHz 的时钟频率下, FPGA 计算一帧图像需要耗费 14 ms, 每秒能计算超过 60 帧图像, 保证了系统的实时性。

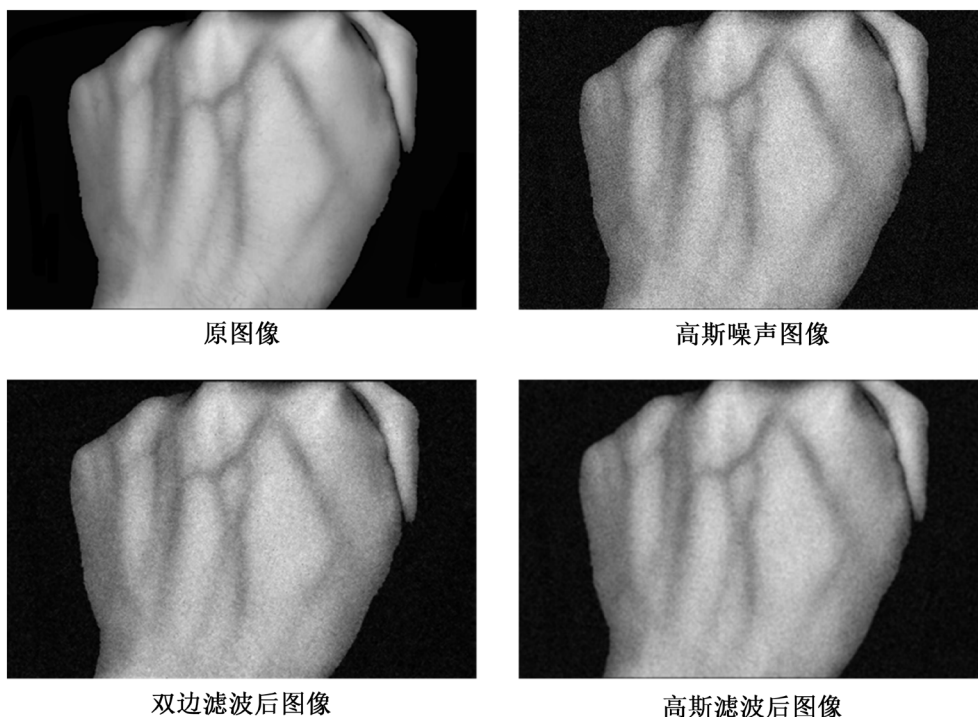


Figure 7. Images filtered by bilateral filter and gauss filter
图 7. 双边滤波与高斯滤波处理后图像

5. 结论

本文采用双边滤波算法对手背静脉图像进行滤波, 与传统的高斯滤波方法相比, 能滤除图像中噪声的同时保持了血管的结构和边缘, 为后续的静脉血管分割和提取奠定良好基础。在 FPGA 上实现的双边滤波算法, 利用 FPGA 并行和流水线计算的优点, 提升了算法运算速度, 满足了手背静脉显像系统实时性的需求, 并提高了图像的清晰度。该算法能广泛应用于图像处理领域, 具有良好的应用前景。

不足之处在于, 目前本文在 FPGA 上实现的双边滤波算法不能动态地调节参数, 只能作算法的验证, 未来需要加入窗口大小以及权重系数结果进行动态调整。

致 谢

非常感谢 2018 国家级大学生创新创业计划资助项目(2018101450201)对本文的资助。

参考文献

- [1] 朱东莹, 吕勇, 沈俊杰. 基于近红外光的静脉深度估算研究[J]. 科技创新与应用, 2018(28): 18-21.
- [2] 白书华. 基于 FPGA 的实时图像采集和去噪系统设计[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2): 163-166.
- [3] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [4] 公羽, 吕志鹏. 基于双边滤波的点云数据预处理方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 125-127.
- [5] 乔峰, 张慧欣. 一种基于 FPGA 硬件求解函数的简化方法[J]. 电子科学技术, 2015, 2(5): 532-537.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-6753，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jisp@hanspub.org