DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.02.042

# 基于 FPGA 的 PET 图像快速边缘检测系统研究

林琦琛,姚敏,赵敏,赵增浩,吴蓉

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

摘 要:正电子发射断层扫描成像(PET)技术作为一种非侵入式成像手段,主要应用于检测工 业件内部结构、缺陷等静态特征。而进行检测件内部的结构分割、缺陷定位等操作一般需要 PET 图像的边缘信息作为参考。为了快速提取 PET 图像的边缘信息,在 FPGA 上设计了一种 基于中值滤波的多方向 Sobel 快速边缘检测优化算法。实验结果表明,该算法在提取清晰图像 边缘的同时,能提升算法上百倍的执行速度。 关键词:正电子发射断层扫描成像;现场可编程逻辑门阵列;边缘检测

中图分类号:TP391.41 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2021)02-0159-04

## Research on Fast Edge Detection System for PET Images Using FPGA

LIN Qichen, YAO Min, ZHAO Min, ZHAO Zenghao, WU Rong

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Being a non-invasive imaging method, positron emission tomography (PET) has strong ability of anti-interference. It is mainly used to detect the static characteristics of industrial parts, such as internal structure and defects in the cavity. In order to extract the edge information of PET image quickly, a multi-directional Sobel algorithm based on median filter is designed and implemented on FPGA. The experimental results show that FPGA can improve the execution speed of the algorithm by hundreds of times while extracting the clear image edge.

Keywords: positron emission tomography; field programmable gate arrays; edge detection

# 0 引言

随着可编程逻辑器件的发展以及芯片制造技术的更新,FPGA 这种独特的芯片结构越发频繁地被应用于快速图像处理中<sup>[1]</sup>。在资源上,FPGA 拥有千万数量级别的门电路,可胜任复杂的图像处理任务;在结构上,FPGA 的可编程开发方式打破了传统定制电路固有的模式,可以灵活地完成电路设计,其独特的并行流水线结构能快速高效地实现边缘检测等一系列高级图像算法<sup>[2-4]</sup>。

在图像处理中,边缘被定义为像素点变化最为剧烈的 点<sup>[5]</sup>。边缘检测的基本思想是在图像中找寻符合的边缘 点后,将边缘点通过特定算法描绘成轮廓信息,提取分界 线从而达到分离图像前景与背景的目的<sup>[6]</sup>,边缘检测一 般由滤波算子与边缘算子组成,常用的滤波算子有中值滤 波、高斯滤波;常用的边缘算子有 Sobel 算子、Canny 算 子<sup>[7]</sup>等。根据 PET 图像特点,本文在 FPGA 上实现了一 种基于中值滤波的多方向快速边缘检测优化算法,可快 速、有效地提取 PET 图像的清晰边缘。

# 1 边缘检测优化算法

# 1.1 中值滤波算子

在利用边缘算子判定图像边缘之前,会对图像进行滤

波处理,目的在于消除测量成像与环境变化所引入的噪声 带来的虚假特征点。正电子图像中的噪声类型通常为椒 盐噪声,因此采用中值滤波对椒盐噪声进行平滑处理。中 值滤波属于非线性滤波器的一种,在中值滤波模板滑过图 像时,将模板中所有像素值进行升序或降序排列,并取得 序列的中位数作为对模板中心像素的滤波结果。本文给 出一种改进的快速并行排序方法,该方法无需实现序列的 全排序,可在更短的时间内使用更少的资源实现中值滤 波。

设置中值滤波的模板大小为 3×3,则从模板内共计 9 个数据中确定中值的步骤如下:

1)将第1行的3个数据进行比较,得到最大值max\_1、 中间值mid\_1、最小值min\_1,以此类推,得到第2行数据的 最大值max\_2、中间值mid\_2、最小值min\_2与第3行数据 的最大值max\_3、中间值mid\_3、最小值min\_3。

2)将3行数据中的最大值进行比较,取最小值 min; 将3行数据的中间值进行比较,取中间值 mid;将3行数据 的最小值进行比较,取最大值 max。

3) 最终从 min、mid、max 中取中间值即为中值滤波的 结果 F\_mid。

以图 1 为例,设置具体实例展示快速中值排序的步骤 流程。

**基金项目**:国家自然科学基金面上项目(51875289,61873124);航空科学基金项目(2016ZD52036);中央高校基本科研业务费专项资金 资助项目(NS2019017);南京航空航天大学研究生创新基金(实验室)开放基金项目(kfjj20190315)

第一作者简介:林琦琛(1994—),男,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为正电子探测成像、FPGA快速图像处理等。



图1 快速中值滤波步骤流程图

#### **1.2** 多方向 Sobel 边缘算子

本文实现的边缘检测的对象主要为正电子发射断层扫 描成像(PET)探测成像的工业件边缘以及缺陷。为了保证图 像中缺陷与被测件中缺陷的位置匹配,边缘算子需保留图像 的方向信息,因此选择 Sobel 算子作为边缘算子。传统 Sobel 算子实现了对 0°水平方向与 90°垂直方向的边缘信息的检 测,模板如式(1)所示。

$$S_{x} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_{y} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$
(1)

其中:S<sub>x</sub>为0°水平方向模板;S<sub>y</sub>为90°垂直方向的模板。

由于传统 Sobel 只对图像两方向的边缘进行检测,这 势必会导致其他方向的边缘信息丢失,影响最终的边缘检 测效果<sup>[8]</sup>。因此在传统两方向 Sobel 算子的基础上,增加 45°与 135°方向的边缘模板,用四方向的改进 Sobel 算子 替代传统两方向 Sobel 算子以获得更为完整的边缘信息, 45°与 135°方向模板如式(2)所示。

$$\boldsymbol{S}_{45} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \boldsymbol{S}_{135} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$
(2)

则图像在中心像素(*x*,*y*)的四方向边缘强度 *G*(*x*,*y*) 可表示为

$$G(x,y) = \frac{1}{\alpha} \sqrt{(G_x^2 + G_y^2 + G_{45}^2 + G_{135}^2)}$$
(3)

其中 α 为防止像素溢出的衰减因子,本文中取 α=2。由 于硬件不擅长处理根号运算,为了方便 FPGA 的实现将 式(3)以一阶范数近似表示为

$$G(x,y) = \frac{1}{\alpha} (|G_x| + |G_y| + |G_{45}| + |G_{135}|)$$
(4)

# 2 边缘检测算法的 FPGA 实现

## 2.1 中值滤波模块的 FPGA 实现

图 2 展示快速中值滤波步骤的同时也反映了中值滤 波在 FPGA 上的设计思路。对于 3×3 的滤波模板而言, 设计单位比较单元,实现对 3 个数据的全排序。根据图 2 中的流程结构,共需设计 7 组比较单元,并将 7 组比较 单元以 3→3→1 的形式组合成并行流水结构,如图 3 所 示。其中比较单元通过并行全比较排序电路实现,其基 本思路为:将每个数依次作为比较数与其他数进行比较, 通过比较结果进行排序值的记录,规定比较数大于排序 数则排序值为 1,比较数小于等于排序数则排序值为 0。 将每个比较数对应的排序值相加,即可获得相应的排序 序列。考虑到输入数据中存在相同数据的情况,若仍以 上述规则求解排序值,则可能会出现排序值求和相同的 情况,造成逻辑电路的数据冲突。因此为避免输入相同 数据而产生数据冲突的情况,对电路输入数据的优先级 和比较准则进行规定:

1)数据的优先级从高到低依次为 din\_1、din\_2、din\_3。



#### 图 2 中值滤波电路 RTL 结构分析图



图 3 并行全比较电路

2)当优先级高的数据作为比较数,出现与优先级低的数据比较结果相同的情况时,排序值记为1。

3)当优先级低的数据作为比较数,出现与优先级高的数据比较结果相同的情况时,排序值记为0。

以上规则保证了在输入数据序列中存在相同数据的 情况下,仍能得到有效的排序序列,避免逻辑电路数据冲 突的产生。

输入数据的判定电路由大于等于比较器和大于比较

器的相互组合实现。电路经过4个时钟周期即可获得对 3个数据的排序结果。中值滤波模块被设计为并行式输 入,这意味着在同一时钟沿下需同时获取相邻的3行图像 数据。FPGA一般以时序对齐的技巧实现,具体实现方法 在下节详细介绍。

# 2.2 边缘检测模块的 FPGA 实现

数据时序对齐是 FPGA 处理空域图像常用的技巧,简 单来说,图像数据是以数据流的形式输入的,为了同时获取 多组相邻行的数据,需将数据流中的数据进行寄存,经过指 定深度的延时后输出。对于一个 3×3 的模板,一般由正在 输入的数据流组合两个级联移位寄存器,实现3行数据的 时序对齐。移位寄存器由 Shift RAM IP 核提供,该 IP 核在 一个时钟周期内可实现指定位数的移位操作,并在深度溢 出后按照先进先出的原则输出寄存的数据。由于四方向 Sobel 算子的模板加权系数均由 1、2、0 组成,在 FPGA 中方 向梯度计算时,对于2次幂的乘法可由左移实现,避免了乘 法器的使用。特别的,由式(4)可知各方向的梯度均以绝 对值的形式给出,为避免引入负数计算,本文使用分类的方 式,比较正负加权系数对应的乘积和的绝对值大小,通过较 大数减去较小数实现各方向梯度绝对值的运算。为了加快 图像边缘检测过程,在FPGA上列了四方向模板的处理模 块,设计了四方向梯度值的并行计算电路,并根据不同方向 模板的加权系数分配模块 I/O 引脚输入。四方向 Sobel 算 子的并行电路结构图如图4所示。四方向梯度值通过3个 加法器进行叠加,将叠加结果右移一位,实现对梯度的衰减 处理,得出的梯度计算结果与设定的阈值相比较,大于阈值 认定为边缘,小于阈值认定为非边缘。边缘检测算法的整 体电路 RTL 结构分析图如图 5 所示。其中: clk 为驱动时 钟信号;per\_clken 为像素使能信号;per\_img\_Y 为像素数据 流;rst\_n 为异步复位信号;post\_clken 驱使下一级电路的像 素使能信号;sobel\_threshold 为设定的阈值;post\_img\_bit 为 边缘判定输出,1代表边缘,0代表非边缘。



图 4 四方向 Sobel 算子的并行电路结构图



图 5 边缘检测电路 KIL 结构

- 3 实验设计与结果分析
- 3.1 实验设计

本文设计了两组 PET 探测实验,实验模型的结构尺

寸设计在 Solidworks 上完成。通过在实心长方体上挖槽 来仿真工业件内部管道结构及缺陷情况,从不同的角度验 证边缘检测算法在 FPGA 上的实现效果与优势体现。

第一组实验为整体轮廓提取实验,设计了工业件内部 最常见的直通道与环形管道模型,用以验证算法对于不同 形状边缘的提取能力。其中,粗通道直径为15mm,细管 道直径为9mm;环形管道内径为20mm,外径为30mm,模 型设计如图6所示。



第二组实验为缺陷轮廓检测实验,在环形管道模型的基础上,增加一处膨胀缺陷和一处不规则裂纹缺陷用以验证算法对于细小缺陷边缘的提取能力。其中膨胀缺陷的最大膨胀深度为5mm,裂纹缺陷的最小宽度为3mm,最大宽度不超过5mm,最大深度为10mm,模型设计如图7所示。



实验流程如图 8 所示。使用注射器缓慢地将配置好的正电子溶液注入模型内部,防止产生气泡影响实验结果,每组实验 PET 探测器扫描时间均为 5 min,最终通过以太网将实验获得的 PET 图像输入到 FPGA (XILINX ARTIX<sup>™</sup> 7 XC7A100T)中进行边缘检测。



图 8 实验流程示意图

## 3.2 结果分析

两组实验数据重建出的 PET 图像如图 9(a) 所示。由 于重建算法中引入了窗口滤波器,因此在急剧而突出的强 边缘区域存在一定的振铃条纹噪声,重建出的切片图尺寸 为 128×128,在 FPGA 上进行边缘检测得到图像边缘检测 的处理效果图如图 9(b) 所示。

边缘检测完成了图像主要边界信息的提取,完整保留 缺陷信息的同时去除了图像周围的振铃条纹噪声,能很好



地反映出被测件的轮廓信息。图 10(b)能清晰地显示出 设计模型的膨胀与裂纹缺陷,尽管边缘图像会在被测物内 部产生部分误判亮点,但是并不影响图像边缘的整体提取 效果。这表明在 FPGA 上能很好地实现图像边缘检测操 作,提取出的图像边缘符合检测要求。经多组重复实验可 知,在 FPGA 上对单张重建图像进行预处理所需的平均时 间为 276 μs,与仿真结果基本一致。边缘检测算法在 CPU 上的执行时间由 MATLAB 给出,对两组实验图像进行了 10次重复实验,得到平均执行时间为 0.19 s,因此在 FPGA 上可实现对边缘检测算法 700 倍的加速。

## 4 结语

本文在 FPGA 上设计了一种基于中值滤波的多方向

Sobel 边缘检测算法,实现了对 PET 图像边缘的快速提取,在得到清晰图像边缘信息的同时,可在 276 µs 内完成 对图像边缘的提取,相比于同等价位 CPU 提升了上百倍 的算法执行速度。

#### 参考文献:

- [1] KURIMOTO Y, NAKAMURA K. Development and applications of a multi-purpose digital controller with a system-on-chip FPGA for accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 840:160-167.
- [2] 杨康,卫敏,孙磊.基于 FPGA 的自适应阈值边缘检测系统设计[J]. 传感器与微系统,2019,38(12):96-99.
- [3] CHEN P Y, KUO Y T, LIN S H, et al. Live demonstration: hardware design of video defogging method for real - time applications [C]//2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, Italy: IEEE, 2018:1.
- [4] HERNÁNDEZ EXPÓSITO D, COBOS CARRASCOSA J P, RAMOS MAS J L, et al. Image compression on reconfigurable FPGA for the SO/PHI space instrument[C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Austin, Texas, USA: Proc SPIE 10707, Software and Cyberinfrastructure for Astronomy V, 2018: 10707.
- [5] 王拯洲,王伟,王维,等. 基于多尺度自适应梯度的图像边缘 检测方法[J]. 计算机工程与设计,2014,35(7):2442-2446.
- [6] 吕彦诚. 图像边缘检测及模式识别技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [7] 石桂名,魏庆涛,孟繁盛. 基于 Canny 算子的图像边缘检测算法[J].现代电子技术,2015,38(12):92-93,97.

收稿日期:2020-01-13

\*\*\*\*\*\*

#### (上接第150页)

车间加工成本最小函数为:

$$f_{4} = \sum_{n=1}^{k} \left[ \sum_{i=1}^{m} \left( \sum_{i=1}^{n} x_{ij}^{p} t_{ij}^{p} \right) o^{p} \right]$$

针对该离散车间生产,排产功能实质是一个并行柔性作 业的车间问题。对此类问题的求解,遗传算法(GA)是一种研 究较多的、具有通用性、易于通过程序实现的方法<sup>[12]</sup>。本文 以遗传算法为主体算法框架结合其他算法的混合算法来解 决车间排产调度问题。通过建模和遗传算法的选择和应用, 能够更好地解决喷涂车间生产调度问题。

## 4 结语

文中针对当前车身喷涂车间存在的一些生产管理问题,设计了喷涂车间 MES 系统。对喷涂车间进行工艺分析和业务流程设计,而后从体系架构、功能模块和与其他软件硬件系统的集成设计了喷涂 MES 系统。重点对喷涂车间相应关键技术进行论述。该系统应用于汽车喷涂车间,有效地解决了车间生产和管理方面的问题,提高了车身喷涂作业效率。对车身喷涂 MES 系统的进一步研究有着一定的参考作用。

#### 参考文献:

[1] 尹志勇.汽车涂装生产线的柔性化关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学,2018.

- [2] 郭义荣.乘用车柔性涂装生产线的智能控制技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.
- [3] 王小维. 汽车工厂 MES 系统设计和实现[D]. 上海: 华东理工 大学, 2016.
- [4] WANG M L, QU T, ZHONG R Y, et al. A radio frequency identification enabled real time manufacturing execution system for one of a kind production manufacturing; a case study in mould industry [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2012, 25(1):20-34.
- [5] 许逵,黄辉先,李康.基于工业现场数据的制造执行系统应用 研究[J]. 计算机测量与控制,2018,26(10):132-136.
- [6] 马天明,蒋庆,毛翎,等.面向离散制造业的制造执行系统的 设计与实现[J].制造业自动化,2016,38(8):77-81.
- [7] 张贵军,陈凯,徐建明,等.MES 实时数据监测系统设计与开发[J].浙江工业大学学报,2017,45(4):401-408.
- [8] 程浩,袁红兵.基于智慧工厂实验平台的制造执行系统(MES) 软件系统设计[J].制造业自动化,2017,39(7):142-146.
- [9] 陈轩,孔建寿,彭忆炎.面向数字化车间的 SCADA 系统设计开 发[J]. 机械制造与自动化,2018,47(4):109-112.
- [10] 钟辉.无线射频识别在整车生产制造执行系统中的应用研究 [D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [11] 潘颖. 离散制造业 MES 系统建模与调度研究[D]. 大连:大 连理工大学,2012.
- [12] 王露. 制造执行系统中数据挖掘关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2017.

收稿日期:2020-01-22