

文章编号:1007-2780(2016)08-0818-07

基于 FPGA 的光条中心线实时提取方法

曲 岳^{1,2*}, 刘艳滢¹, 王延杰¹, 张 雷^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:随着高铁的普及, 列车螺钉松动、车身变形等安全问题渐渐引起了人们的重视, 如何检测高铁车身是本文要研究的问题。本文采用激光三角法测量模型, 当线结构光扫描高铁车身时, 可以根据激光条纹的畸变程度, 判断高铁列车是否存在安全隐患, 而如何快速、精确地提取激光条纹中心线是首先要解决的问题。在考虑了光源选择、环境噪声、被测物反射等因素的基础上, 首先对图像进行预处理, 选择中值滤波去除噪声, 然后用最大类间方差法将目标区域与背景区域分割; 最后, 用改进的灰度重心法对目标区域进行中心线提取。本文在 FPGA 上实现了对分辨率为 $1\,024\text{ pixel} \times 200\text{ pixel}$ 图像的处理, 实验结果表明, 提取光带中心线用时不超过 0.97 ms , 能够满足高铁检测系统对光带中心线提取实时性和准确性的要求。

关 键 词: 中值滤波; 最大类间方差法; 灰度重心法; FPGA

中图分类号: TN791; TP391.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163108.0818

Real-time extraction of light centerlines based on FPGA

QU Yue^{1,2*}, LIU Yan-ying¹, WANG Yan-jie¹, ZHANG Lei^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanic and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: With the popularization of high-speed rail, the screw loosening, body deformation and other safety issues gradually attract people's attention, and how to check the rail body is the research field. Using laser 3-dimension measurement model, when the line structure light scans high-speed rail body, it can estimate whether high-speed rail safety hazards exist according to the degree of distortion of the laser stripe. How to quickly and accurately extract the center line of the laser stripe has become the primary problem. Based on the consideration of the factors, such as the selection of the light source, the environmental noise, and the reflection of the measured object, first, we use median filter to remove the noise as pre process, and then target area and background are segmented by OTSU; finally, we use improved gray barycenter method to extract the center line of target area. In this paper the image is $1\,024\text{ pixel} \times 200\text{ pixel}$ in FPGA, the experience shows that extraction time of center line is less than 0.97 ms . The algorithm can satisfy the requirements of high-speed rail detection system for

收稿日期: 2016-04-19; **修订日期:** 2016-05-13.
基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划 (No.2015AA703101013)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA703101013)

* 通信联系人, E-mail: quyue1221@163.com

light centerline extraction of real-time as well as high precision.

Key words: median filter; OTSU; gray barycenter method; FPGA

1 引 言

高铁日渐受到人们的青睐,具有运行快速、乘坐舒适等优点,已经成为重要的交通工具之一。高铁列车螺钉松动、车身变形、有异物等安全问题需要格外重视。本文采用激光三角法测量模型^[1-4],当线结构光扫描高铁车身时,可以根据激光条纹畸变程度,判断高铁列车是否存在安全隐患。那么如何实时、准确提取光条中心线就成了车身安全性检测的首要问题。

线结构光扫描是目前三维测量的重要手段之一,具有非接触、测量速度快、精度适中等优点,在工业测量等领域中有着广泛的应用。主要由线激光器、CCD 摄像机、计算机及采集设备构成。线激光器投射的光束与被测物体表面相交,在被测物表面产生光条,该光条受被测物表面几何形状影响变成畸变、不连续的光条,这种变化的程度则包含了物体表面的深度信息。获取被测物对光条的调制图像,再对图像进行分析,提取光条中心位置坐标就能够获取光条的偏移量,从而获得被测物体表面的结构信息。那么实现对光条中心线快速、精确地提取有着重要的意义。

常见的光条中心线提取法^[5-10]有极值法、阈值法、重心法、梯度重心法、曲线拟合法和 Hessian 算法等,提取速度和提取精度,很难同时兼顾二者。但高铁列车检测问题,对提取速度和精确度提出了更高的要求。FPGA 具有集成度高,运算速度快的

特点,本文利用 FPGA 实现算法,可以提高光条提取速度,并且准确性也能得到保障。

2 基本原理

2.1 图像去噪

在实际的测量过程中,由于环境光照不稳定,被测物反光,相机感光面的成像噪声,图像采样、量化的误差等多种因素的影响,使得获取的图像是带有大量噪声的,这给准确提取光带中心线带来了麻烦。为了能够更加快速、更加准确地提取光带中心线,选择一个能够最大程度滤除噪声的方法,是十分重要的。通过对采集的图像进行分析,可知图像中主要存在的是椒盐噪声,因而本文采用中值滤波对图像进行预处理,能够消除大部分的噪声,滤噪效果不错。

2.2 图像分割

阈值法是一种最常见的图像分割方法,分为固定阈值分割与自适应阈值分割两类。固定阈值分割要根据实验环境和测量方法等具体情况,经过多次实验来决定,具有很大的局限性。本文采用自适应阈值分割法中最具代表性的最大类间方差法^[11-12](又称大津法,简称 OTSU)。该方法具有广泛的适用性,对具有不同灰度分布规律的图像都能应用,弥补了传统的基于直方图的阈值分割法对图像模型假设的种种缺陷,无论直方图有无明显双峰,都能得到较满意的分割效果。由文献^[12]可知,求取最佳阈值 T 的公式如下:

$$T = \text{Arg Max}_{0 \leq t \leq L-1} [p_A (\omega_A - \omega_0)^2 + p_B (\omega_B - \omega_0)^2] =$$
$$\text{Arg Max}_{0 \leq t \leq L-1} \left(\sum_{i=0}^t n_i \times \sum_{i=t+1}^{L-1} n_i \right) \left(\frac{\sum_{i=0}^t in_i}{\sum_{i=0}^t n_i} - \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} in_i}{\sum_{i=t+1}^{L-1} n_i} \right)^2. \tag{1}$$

最大类间方差法的基本思想是根据图像的灰度直方图,利用类间距离极大准则来确定区域分割的阈值。方差是灰度分布均匀性的一种度量,方差越大,说明构成图像的两部分差别越大,当目

标与背景错分会使得两部分的差别变小,因此类间方差最大就能够使得错分概率最小。

2.3 光条中心线提取

单色激光器射出的光线一般认为是服从高斯

分布的,为了获得被测物的结构数据,需要求出由被测物三维结构引起的光条高斯分布中心偏移量,因而光带中心线获取的关键就是求取高斯分布函数的极值点。根据这一思想提出了多种提取方法:极值法是把光强的极大值作为光带中心,该方法比较简单、运算量小,但精度低、受噪声影响严重;阈值法以灰度值大于预设门限的左右两像素为起点和终点,二者的平均位置即光条中心,该方法速度较快,但定位不够准确;曲线拟合法是以每一行中现有光带上像素点的灰度值,拟合出一条高斯曲线,该方法精度高,但需要的采样点较多,不适合多条窄带光条中心提取;重心法是从物理学中的刚体质心演化而来的。设 x 轴上 n 个离散点的坐标为 x_i , 质量为 m_i , 则 n 个点的质心为:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} . \tag{2}$$

由于一般情况下刚体质心和重心重合,在此基础上提出的基于极大值的重心法、基于背景阈值的重心法等^[13],虽然运算速度快,精度也较好,但受环境噪声影响严重。本文针对重心法受噪声影响严重的问题,对算法进行了改进。

在图像预处理过程中,中值滤波去除了大部分的噪声,但仍存在少量噪声的干扰,使光条中心的提取精度受到影响。光强保持不变的情况下,采样点离中心线越远,对所求的光条中心偏移影响就越严重。要使提取的中心点更接近实际光带中心,就需要增加距离光条实际中心较近的采样点的权重,为此本文提出了一种新的方法,能够增加灰度值大的采样点对所求的光带中心影响,其公式为:

$$x_c = \frac{\sum_{x=1}^n I^2(x) x}{\sum_{x=1}^n I^2(x)} , \tag{3}$$

$$y_c = \frac{\sum_{y=1}^n I^2(y) y}{\sum_{y=1}^n I^2(y)} , \tag{4}$$

公式(3)中, x 为像素点的横坐标; $I(x)$ 为一行中横坐标为 x 的像素点的灰度值;将 $I(x)$ 平方,实际上就是通过平方加权的方式增大了光带上灰度值大的点在确定光带中心时的权重,这就使得实际提取的光带中心更加接近于实际上的光带中心。同理,根据公式(4)也可以找到中心线。文献[14]中提到的方法,将背景减去就是在运算中减小了背景对光条光强分布的影响。而本文先

对采集图像用最大类间方差法进行了图像分割,提取出了感兴趣部分,这大大减少了提取光条中心线的时间,不需要在提取时将背景减去。

3 FPGA 实现

FPGA 是在 PAL、CPLD、EPLD 等可编程器件的基础上发展而来的产物,是一种半定制电路,既弥补了定制电路的不足,又解决了原有编程器件的门电路有限的问题。FPGA 的集成度很好,器件密度数万门到数千万门不等,能够实现复杂的时序与逻辑电路,适用于高速度、高密度、高精度的数字逻辑电路设计领域。

3.1 中值滤波模块

中值滤波^[15-16]是一种常见的滤波方法,对椒盐噪声具有显著的滤波效果。另外,中值滤波属于非线性空间滤波,与线性滤波相比,不仅能很好地滤除脉冲噪声,同时还能保护图像的边缘。用软件处理图像,虽然计算简单,然而计算量较大,会消耗很多时间而减慢处理速度;而 FPGA 适合处理这类计算简单但数据量巨大的任务,FPGA 的使用大幅提高了中值滤波处理速度,更好地实现了图像的实时处理。中值滤波器的硬件结构框图如图 1 所示,由两个行缓存器,一个 3×3 寄存器阵列模型,7 个三点比较器组成,三点比较器具体硬件结构如图 2 所示。

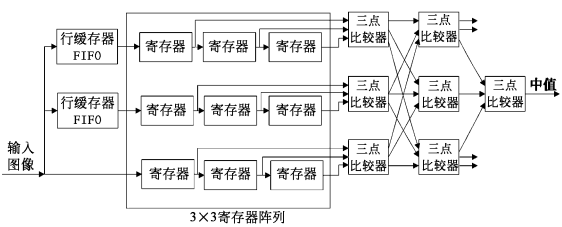


图 1 中值滤波硬件结构框图

Fig.1 Hardware structure block diagram of median filter

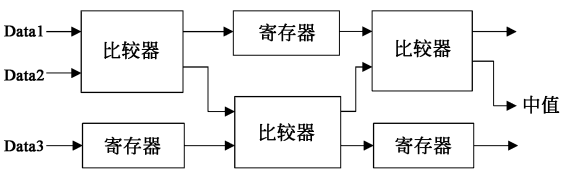


图 2 三点比较器硬件结构框图

Fig.2 Hardware structure block diagram of three point comparator

在图 1 中,本文选取 3×3 寄存器阵列模板,然后用三点比较器将模板中的 9 个像素按其灰度值排序,排序后获取中间值,用该中值代替原窗口中间像素的灰度值,这样椒盐噪声就会在排序的过程中被排到了两个端点,灰度值排在中间位置的像素点一般都不是椒盐噪声,从而可以起到抑制噪声的作用。利用 3×3 模板阵列,结合 FPGA 并行处理的特点,提高了单位时间处理数据的能力,也提高了图像处理的效率。中值滤波对那些与周围像素灰度值差别较大的像素点不太那么敏感,可以消除孤立的噪声点,也可以减少图像产生的模糊。

3.2 OTSU 模块

OTSU 模块的硬件结构如图 3 所示,用到了三个乘法器,两个除法器,一个加法器和一个减法器。本文直接调用了 Xilinx 公司的 IP 核来实现乘法器和除法器,既能获得最佳性能,又能节约时间。

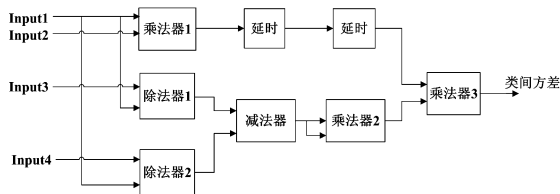


图 3 OTSU 模块硬件结构框图

Fig.3 Hardware structure block diagram of OTSU

OTSU 的基本思想是根据图像的灰度直方图,利用类间距离极大准则来确定区域分割的阈值。由图 3 和公式(1)可知,只需要知道 input1、input2、input3、input4 即可求出阈值 T ,便可对图像进行分割,而这 4 个数据是由直方图统计得到的结果,具体表示为:

$$\begin{aligned} \text{input1} &= \sum_{i=0}^L n_i, \text{input2} = \sum_{i=0}^{L-1} n_i \\ \text{input3} &= \sum_{i=0}^L i n_i, \text{input4} = \sum_{i=0}^{L-1} i n_i \end{aligned}$$

图 3 中,乘法器 2 相当于做了一个平方运算,再与乘法器 1 的值进行乘法运算。通过上述分析,可以把最大类间方差法的计算过程分成统计和计算两部分,先对图像数据进行存储和统计,再针对每一帧图像计算最大类间方差,从而得到阈值,进而可以对图像实现最大类间方差法的图像

分割。

3.3 光条提取模块

本文采用的光条提取方法是灰度重心法^[17],是一种计算简单,精确度较高的方法。用 FPGA 来实现该算法,能够更加快速,以达到实时提取的目的。光条提取模块是由 3 个乘法器,2 个除法器 and 3 个加法器组成,硬件结构如图 4 所示。

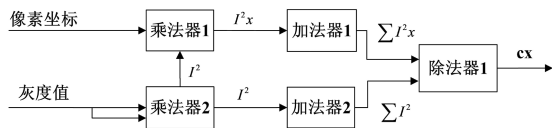


图 4 灰度重心法硬件结构框图

Fig.4 Hardware structure block diagram of gray barycenter method

在图 4 中,加法器 2 处得到的结果是 $\sum I^2$,即公式(3)的分母部分,与加法器 1 的结果做除法运算,从而得到中心坐标 cx 。将图像数据按行输入处理,若能找到 cx ,该行对应的纵坐标就是 cy ,若找不到 cx ,则继续在下一行检索。该结构将图像数据逐行逐像素顺序输入,采用单像素流水线工作方式,数据以像素为单位进行处理,数据处理过程只需等待一个像素的读入时间就开始进行,实现取数、处理过程的高度并行,处理过程十分高效。

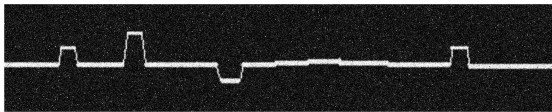
4 实验结果

本文采用 Xilinx 公司生产的 xc7k325t-2ffg900 型号的芯片,利用软件 ISE14.7 运行程序,工作频率为 20 MHz。图 5 为各个模块实验结果展示,图(a)为高铁车身模拟图,两处小突起表示正常螺钉的高度,大突起表示螺钉松动但未脱落,而凹陷处表示螺钉已经脱落,图中有一段不平滑的光带表示车身表面变形,不平整。

在图 5(a)中,可以看到图片中含有大量噪声,主要是椒盐噪声;经过中值滤波处理,在图(b)中几乎看不到噪声,滤噪效果较好;将图(b)与图(c)进行对比,可看出经过 OTSU 分割的图(c)中,目标区域与背景界限更明显,光带有一定的细化作用;(d)为中心线提取结果,提取的中心线较为平滑,效果较为理想。

图 6 为光条提取的仿真波形,从图中可知提

取一幅 $1\,024\text{ pixel} \times 200\text{ pixel}$ 图像的中心线坐标的时间小于 0.97 ms ,提取速度较快,可以达到实时性的要求。



(a)高铁车身模拟图
(a)Simulation of high speed rail body



(b)中值滤波结果
(b) Result of median filter



(c)最大类间方差分割结果
(c) Result of OTSU



(d)中心线提取结果
(d)Result of strip center extraction

图 5 实验结果

Fig. 5 Results of experiment

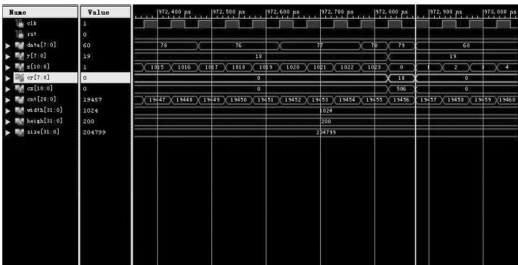


图 6 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms

从表 1 中可以看出,本文采用的方法资源消耗较少,成本较低,能够满足实际工业应用的要求。

表 2 给出了本文方法与文献[6]及文献[7]中

所用方法的耗时对比,如表 2 所示。

表 1 资源消耗

Tab.1 FPGA resource consumption

Slice Logic Utilization	Used	Available	Utilization /%
Slice Registers	521	407,600	1
Slice LUTs	302	203,800	1
Occupied Slices	118	50,950	1
Flip Flop	24	413	5
LUT	111	413	26
LUT-FF pairs	278	413	67
DSP48E1s	1	840	1

表 2 时间分析

Tab.2 Time analysis

提取方法	图像尺寸	提取时间
文献[6]的方法	$1280 \times 1024\text{ pixel}$	75 ms
文献[7]的方法	$1280 \times 1024\text{ pixel}$	47 ms
本文方法	$1024 \times 200\text{ pixel}$	0.97 ms

由表 2 可以看出,文献[6]和文献[7]的图像尺寸是本文的 6.4 倍,但是提取时间却是本文方法的 48 倍和 77 倍,实验结果表明,本文的方法耗时短,具有较高的实时性。

5 结 论

本文对传统的灰度重心法进行了改进,并在 FPGA 上实现,以达到减少延时,满足实时性的要求。先对图像进行中值滤波处理,利用 3×3 寄存器模板阵列,并结合 FPGA 的并行特点,采用 3 级并行处理,大大提高了单位时间处理数据的能力和图像处理的效率;再用 OTSU 法将目标区域与背景分割出来,便于光条中心线的提取。采用本方法对分辨率为 $1\,024\text{ pixel} \times 200\text{ pixel}$ 的图像进行实验,提取光带中心线用时不超过 0.97 ms 。与软件实现算法相比,采用 FPGA 实现算法,不仅能达到图像实时处理的要求,而且系统硬件结构简单、消耗资源少、集成度高,模块化的方式可移植性好,便于应用到更多实验中。

参 考 文 献:

- [1] 许宁.线结构光光条图像处理方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
XU N. Research on image processing of line structured light strip [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [2] Abraham M T, CHANG Y W, LIU H W, *et al.* White light triangulation sensor for flexible inspection system [C]. 2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST), Auckland, NEW Zealand; IEEE, 2015; 765-768.
- [3] 吕乃光,孙鹏,姜小平,等.结构光三维视觉测量关键技术的研究[J].北京信息科技大学学报,2010,25(1):1-5.
LÜ N G, SUN P, LOU X P, *et al.* Key techniques for 3-D structured light photogrammetry [J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2010, 25(1): 1-5. (in Chinese)
- [4] 贾琦.基于三角测量法的激光位移传感器的研究[D].长春:长春理工大学,2014.
JIA Q. Research on the system of laser triangulation measuring [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 李莹莹,张志毅,袁林.线结构光光条中心提取综述[J].激光与光电子学进展,2013,50(10):100002.
LI Y Y, ZHANG Z Y, YUAN L. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100002. (in Chinese)
- [6] 郭奎,熊显名.复杂背景下蓝色线结构光中心提取方法[J].计算机系统应用,2014,23(6):111-117.
GUO K, XIONG X M. Method for extracting the center position of blue linear structured light in the complex background [J]. *Computer Systems & Applications*, 2014, 23(6): 111-117. (in Chinese)
- [7] 张瑞瑛,周萍,冯煦,等.大视场下线结构光光条中心的快速提取[J].应用光学,2010,31(3):432-436.
ZHANG R Y, ZHOU P, FENG X, *et al.* Rapid extraction of line-structured light stripe in large field of view [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 432-436. (in Chinese)
- [8] 李丹,耿楠,亢娟娜.复杂背景下光条中心提取算法研究[J].计算机应用与软件,2013,30(3):271-273,314.
LI D, GENG N, KANG J N. Research on laser stripe centre extraction algorithm under complex background [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(3): 271-273, 314. (in Chinese)
- [9] 蔡怀宇,冯召东,黄战华.基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J].中国激光,2015,42(3):0308006.
CAI H Y, FENG Z D, HUANG Z H. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0308006. (in Chinese)
- [10] 郭玲,朱茂之.结构光条纹中心线的鲁棒提取[J].光电技术应用,2014,29(4):30-33,75.
GUO L, ZHU M Z. Robust method of linear structured light center line extracting [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(4): 30-33, 75. (in Chinese)
- [11] 江亲瑜,李平,孙兰.最大类间方差算法在运动检测系统中的应用[J].计算机应用,2011,31(1):260-262.
JIANG Q Y, LI P, SUN L. Application of Otsu method in motion detection system [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(1): 260-262. (in Chinese)
- [12] 王喙来,杨春玲.基于最大类间方差法的图像分割系统的设计与实现[EB/OL].2008-06. <http://www.altera.com.cn/education/univ/local/events/articles/july08-3.pdf>.
WANG J L, YANG C L. Implementation of image segmentation system based on Otsu method [EB/OL].2008-06. <http://www.alter-a.com.cn/education/univ/local/events/articles/july08-3.pdf>. (in Chinese)
- [13] SIRKIS J S. System response to automated grid methods[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(12): 1485-1493.
- [14] 王文成,徐建强,司书春.一种改进的重心法在光带中心提取中的应用[J].光电子·激光,2005,16(10):1239-1242.
WANG W C, XU J Q, SI S C. A improved barycenter method used in light-trap center acquiring [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(10): 1239-1242. (in Chinese)
- [15] 郭帅.基于FPGA的高速图像处理研究[D].成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所),2007.
GUO S. Research of high-speed image processing algorithms based on FPGA [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [16] 李轶博,李小兵,周炯.基于FPGA的快速中值滤波器设计与实现[J].液晶与显示,2010,25(2):292-296.

LIY B, LI X B, ZHOU X. Design and realization of fast median filter based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(2): 292-296. (in Chinese)

[17] 樊志华,王春鸿.一种无需乘法器的光斑质心定位方法[J].光电工程,2010,37(12):17-24.

FAN Z H, WANG C H. High-speed centroid calculation of spot image without multipliers [J].*Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(12): 17-24. (in Chinese)

作者简介:曲岳(1990—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要研究计算机视觉与图像处理,FPGA。E-mail: quyue1221@163.com