

文章编号: 1672-8785(2020)04-0027-09

基于细胞免疫的红外图像分割 算法及 FPGA 实现

李大华^{1,2} 王 宇^{1,2} 高 强^{1,2} 于 晓^{1,2*}

(1. 天津理工大学电气电子工程学院, 天津 300384;

2. 天津市复杂系统控制理论与应用重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 在工业生产中, 高温蒸汽管道通常用于输送高温蒸汽和高温工业废水等。但为了安全起见, 管道通常被放置在环境比较复杂的地方, 这不利于工人对管道进行检测与维护。如何快速地定位复杂背景下蒸汽管道的位置并对周围环境进行区分成了一个亟待解决的问题。由于最大类间方差(Otsu)算法不能满足上述要求, 基于细胞免疫机制提出了一种改进的 Otsu 算法。根据红外图像中管道以及复杂背景的特征, 该算法计算出两个不同的阈值, 并将它们分别用于管道的提取与复杂背景的区分。借助 Quartus II 软件搭建了基于现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的软硬件系统, 实现了数据通信传输, 并对改进的 Otsu 算法进行了验证。实验结果表明, 该算法在应用于管道红外图像时可以取得较好的效果。与几种边缘检测算子和经典 Otsu 算法相比, 本文算法无论是用于管道的提取, 还是用于复杂背景的区分, 都具有较高的真阳性率(True Positive Rate, TPR)和较低的假阳性率(False Positive Rate, FPR)。

关键词: 红外图像; 现场可编程逻辑门阵列; 细胞免疫; 阈值分割

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.04.005

Infrared Image Segmentation Algorithm Based on Cellular Immunity and Its FPGA Implementation

LI Da-hua^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, GAO Qiang^{1,2}, YU Xiao^{1,2*}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Control Theory and Application in Complicated Systems, Tianjin 300384, China)

Abstract: In the industrial production, high temperature steam pipelines are usually used to transport high temperature steam and high temperature industrial waste water, etc. But the pipelines are often placed in com-

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61502340); 天津市自然科学基金(18JCQNJC01000); 天津市教委科研计划项目(2018KJ133); 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室开放基金(TJKL-CTACS-201907)

作者简介: 李大华(1978-), 男, 天津人, 副教授, 主要研究方向为图形图像处理、教学理论与实践。

***通讯作者:** 于晓, 男, 山东临沂人, 副教授, 主要研究方向为机器视觉与人工智能。

E-mail: yx_tjut@163.com

plex environments for safety, which is not conducive to the inspection and maintenance of pipelines for the workers. How to quickly locate the location of the steam pipeline in the complex background and distinguish the surrounding environment has become an urgent problem to be solved. Because the Otsu algorithm cannot meet the requirements mentioned above, an improved Otsu algorithm is proposed based on the cellular immunity mechanism. According to the characteristics of the pipelines and the complex background in the infrared images, the algorithm calculates two different thresholds which can be used to extract the pipelines and distinguish the complex background. With the help of the Quartus II software, a hardware and software system based on FPGA has been built to realize the data communication and transmission, and the improved Otsu algorithm has been verified. The experimental results show that the algorithm can be applied to the infrared images of the pipelines to obtain better effect. Compared with several edge detection operators and the classical Otsu algorithm, the improved algorithm has a higher true positive rate (TPR) and a lower false positive rate (FPR), both for the pipelines extraction and the complex background distinction.

Key words: infrared image; FPGA; cellular immunity; threshold segmentation

0 引言

在实际的工程生产中, 高温蒸汽管道通常用于传输高温蒸汽和高温工业废水等。由于长期运输高温产品, 该管道的损耗会比较严重, 因此管道维护与检修就显得尤为重要。考虑到安全方面的因素, 高温管道通常都被放置在环境比较复杂、人烟比较稀少的地方。在管道维护与检修的过程中, 维修工人就需要对周围环境有一定的了解。利用红外热像仪可以方便地拍摄高温管道图像, 但由于复杂环境的影响, 在红外图像上并不能轻易地分辨出管道与周围复杂的背景环境。因此, 在复杂背景中快速定位管道区域并对复杂背景进行区分, 能够为工人维修管道提供便利。

国内外众多学者对如何提取与分割复杂背景下的红外图像目标进行了深入研究, 并取得了许多成果。一般图像分割方法有基于阈值的分割方法^[1-2]、基于边缘的分割方法^[3]、基于区域的分割方法^[4]和基于小波变换的分割方法^[5]等。2008年, Huang D Y 等人^[6]提出了一种新的二级多阈值 Otsu 方法。该方法大大减少了计算图像中类间方差所需的迭代次数。与经典的 Otsu 算法相比, 它具有更高的效率与精度。2014年, Bhandari A K 等人^[7]提出了一种改进的基于不同目标函数的人工蜂群 (Modified Artificial Bee Colony, MABC) 卫星图像分割算法。该算法采用了一种改进的解搜索

方程和混沌系统以及基于对立面的学习方法, 能够高效、准确地搜索多级阈值。2019年, Elaziz M A 等人^[8]利用差分进化算法确定了其他多种随机过程 (Metropolis-Hastings, MH) 算法的最佳组合。通过将其与 Otsu 算法结合, 能够找到最大化 Otsu 函数的最优阈值。该方法在性能指标、峰值信噪比、结构相似性指数、适应度函数值和计算时间等方面均优于其他图像分割方法。

Otsu 算法^[9]在 1979 年被提出之后一直被认为是一种简单实用的阈值选取方法。该算法通过设定阈值将图像像素分成背景和目标两部分, 然后计算最佳阈值来区分背景与目标, 使得两类像素的区分度达到最大。但 Otsu 算法只能通过图像像素特征确定一个阈值来将图像分为背景与目标两部分, 而并不能对目标背景进行区分, 因此要对该算法进行优化。

关于细胞免疫学, 经典的案例是中国医生在 16~17 世纪利用接种“人痘苗”的方法预防天花并取得了成功。1880 年, 法国科学家 Pasteur L 制备了用于预防炭疽、狂犬病等传染病的病毒活疫苗, 让细胞免疫这个概念正式被世界承认。1883 年, 俄国学者 Mechnikov 首先提出细胞免疫学说而获得了诺贝尔奖。1976 年, Morgan 等创建了 T 细胞克隆技术, 并采用这项技术建立了一系列抗原特异性 T 细胞的克隆方法。这对细胞免疫学研究起到了巨大

的促进作用。2009 年, Elgueta R 等人^[10]发现了 CD40 作为靶点在抗肿瘤免疫中的作用, 为利用 CD40 分子治疗肿瘤细胞提供了思路。2011 年, West A P 等人^[11]通过研究发现线粒体参与广泛的先天免疫途径, 发挥信号平台的作用, 并促进效应反应。除了调节抗病毒信号外, 线粒体还通过产生活性氧促进抗菌免疫, 并有助于细胞损伤和应激后的先天免疫激活。2019 年, Wilson D S 等人^[12]提出了一种合成的糖类佐剂 p(Man-TLR7)。当它与抗原结合时, 可引起强大的体液和细胞免疫。该成果为提高蛋白亚单位疫苗的免疫原性提供了方向。

文献^[13]中描述的细胞免疫原理是, 某种病原体(即抗原)进入身体后会刺激 B 细胞增殖分化为浆细胞, 浆细胞合成分泌的相应抗体与抗原结合, 从而消灭该病原体^[13]。因为浆细胞分泌的抗体只能与刺激它产生的抗原相结合, 所以细胞免疫具有特异性。基于这种免疫机制, 并结合经典的 Otsu 算法, 本文提出了一种基于细胞免疫的改良 Otsu 算法。该算法对图像像素进行计算, 然后根据图像中管道与复杂背景不同的像素特征得到两个阈值, 并分别将其用于管道的分割和复杂背景的区分。

1 问题分析

图 1 为在不同环境下拍摄三类高温蒸汽管道图片。由于管道温度较高, 实际工业生产中一般将其建在地理位置比较偏僻的地方。图 1(a)、图 1(b)和图 1(c)这三类管道红外图像中的背景都比较复杂, 且红外摄像机实地拍摄时又存在着限制, 因此这三幅红外图像的形状大小各不相同, 图像特征存在一定的差异。

具体说来, 图 1(a)中管道周围的背景分布比较密集, 周围环境容易对管道的分割造成影响。从直方图可以看出, 图像中的灰度存在多个峰值, 这在一定程度上加大了背景分割的难度。图 1(b)中的管道处于比较复杂的环境中, 其后方存在较多树木的干扰, 前方也有遮挡物, 这增加了管道提取的难度。灰度直方图中仅存在两个明显峰值, 意味着管道与背景的

特征差异较大。图 1(c)中管道周围的背景简单, 并且管道与周围环境的温差较大, 导致管道与背景的特征区别十分显著。

图 2 是分别使用 Sobel、Robots、Canny 和 Otsu 算法对图 1(a)进行分割的结果。可以看出, 这几种算法都没有达到想要的效果。其中, 用 Sobel 和 Robots 算法分割出来的图像非常相似, 都只是简单勾勒出了管道边缘以及管道上方一小块树木的部分, 而并不能对管道后方温度较高的背景部分进行有效分割。与前两种算法相比, Canny 算法能够比较完整地将管道与背景中的树木勾勒出来, 但是仍无法有效地对管道与背景进行区分。经典 Otsu 算法能将温度较高的管道部分分割开来, 但是并不能对管道后方的背景信息进行区分。

2 基于细胞免疫的 Otsu 算法

2.1 细胞特异性免疫机制

细胞免疫是指生物经过后天感染或者人工接种某种病原体(抗原)而使机体获得抵抗感染的的能力^[14]。这种能力是通过病原体刺激生物机体产生抗体而获得的。抗体能与抗原产生特异性反应, 使细胞免疫具有特异性。细胞的免疫过程一般分为以下三步:

(1)识别阶段: 抗原进入生物体, 巨噬细胞等免疫细胞吞噬处理抗原, 并将抗原信息传递给体内的 T 细胞和 B 细胞。这两种细胞通过表面的受体来识别抗原。

(2)分化阶段: 在抗原刺激 T 细胞和 B 细胞之后, 这两种细胞进行增殖和分化。T 细胞分化为效应 T 细胞和记忆 T 细胞; B 细胞分化为效应 B 细胞和记忆 B 细胞。其中, 效应 T 细胞能分泌免疫活性物质——淋巴因子, 它可通过加强各种相关细胞的功能来发挥免疫作用; 效应 B 细胞也称为浆细胞, 能够通过分泌抗体来消灭抗原以实现免疫过程。

(3)效应阶段: 效应 T 细胞具有两个功能, 一是直接与靶细胞接触使靶细胞裂解死亡, 并暴露抗原使它被抗体粘附; 二是释放淋巴因子来加强巨噬细胞、杀伤细胞等免疫细胞

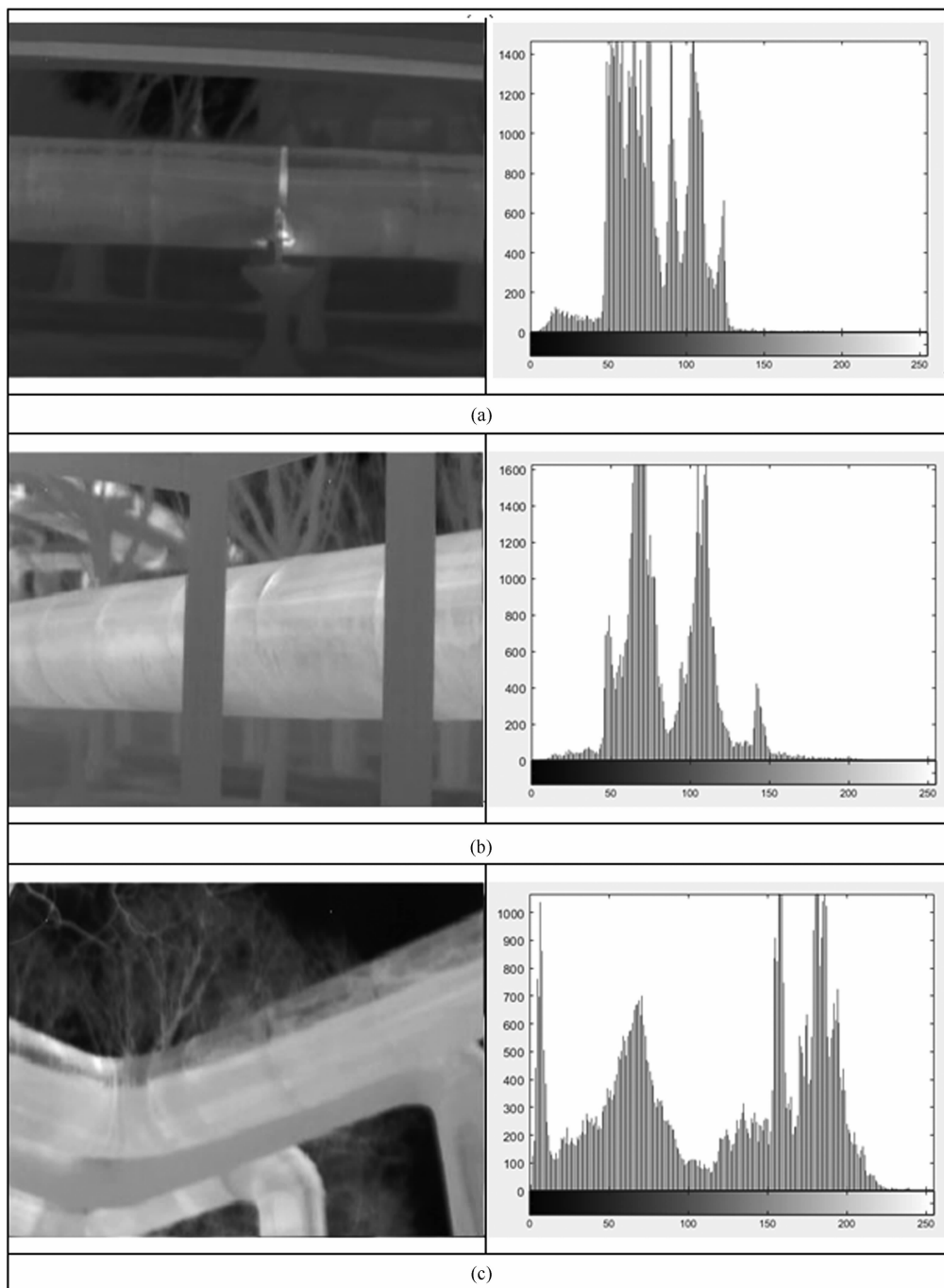


图1 高温蒸汽管道的红外图像及其灰度直方图

的作用，从而间接消灭抗原。浆细胞能够合成分泌抗体，并通过体液免疫来消灭抗原。

生物体的免疫系统有严格的分工，所以由抗原 A 刺激产生的抗体 A 只能作用于抗原 A，而不能作用于抗原 B。没有任何一种抗体能够同时作用于两种不同的抗原。如果违反了这一规则，那么生物机体的内部系统将会受到破坏。

2.2 基于细胞免疫的 Otsu 算法流程

为了分割出红外图像中的管道并对其复杂背景加以区分，需要确定两个阈值：第一个用于定位，并将管道目标与复杂背景分离；第二个用于将复杂背景中的干扰物与背景区分开来。本文借鉴细胞特异性免疫的思想，提出了一种基于细胞免疫的 Otsu 算法。该算法对管道红外图像的灰度特征进行分析，并逐点计算

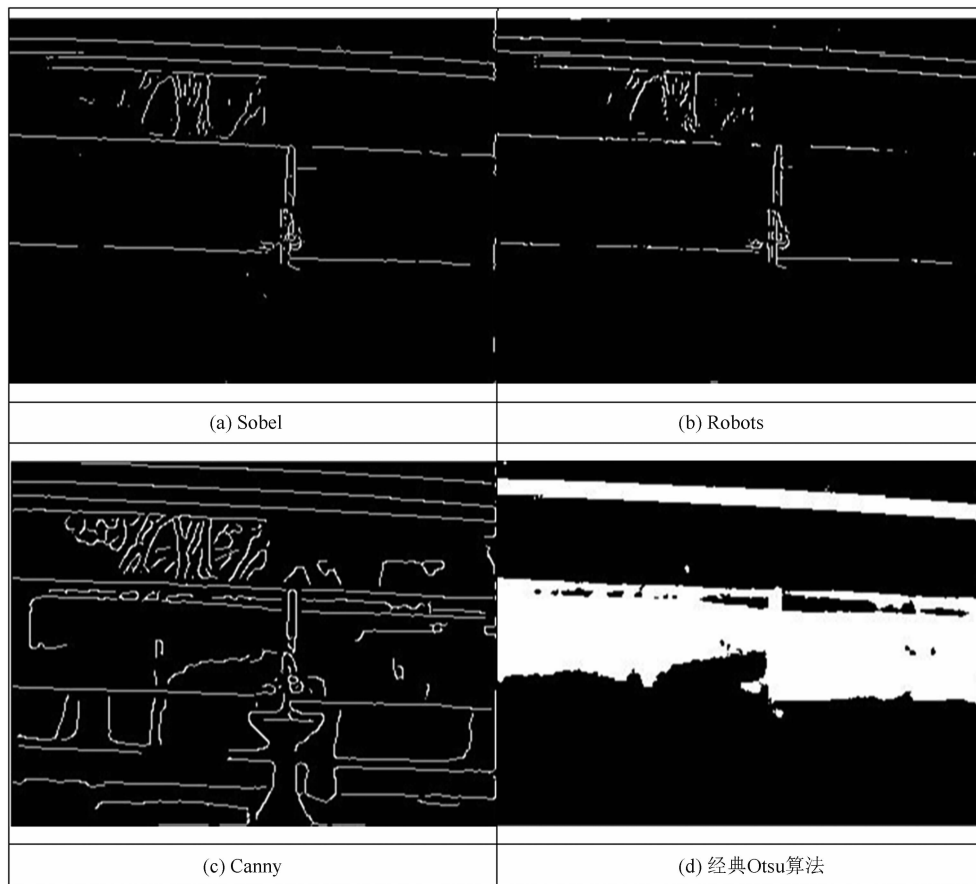


图 2 传统边缘检测算法的处理图

其类间方差。当类间方差达到最大值时，得到阈值 T_1 。类似于细胞特异性免疫机制中由抗原 A 刺激产生的抗体 A 只能作用于抗原 A，阈值 T_1 是根据管道与背景特征计算出来的，所以它仅用于管道目标和复杂背景区域的分割。在得到管道部分后，将原始图像信息减去管道信息，然后在剩下的复杂背景区域中逐点计算其类间方差。当类间方差达到最大值时，得到阈值 T_2 。根据细胞特异性免疫机制， T_2 仅用于复杂背景中干扰物与背景区域的分割。

2.3 基于细胞免疫的 Otsu 算法实现

首先，对拍摄到的管道红外图像进行灰度处理，得到灰度信息。设灰度的级数范围为 $\{0, 1, 2, \dots, S\}$ ，图像大小为 $M \times N$ 。对图像上的不同灰度等级进行统计，得到其概率分布 (n_i 是灰度级为 i 的像素数)：

$$P_i = \frac{n_i}{M \times N} \quad (1)$$

设一个阈值 T ，将整幅灰度图像分割为两类(目标与背景)。图像中灰度小于 T 的像素个数为 N_0 ，它们在整幅图像中的比例为 ω_0 ，该区域的灰度均值为 μ_0 。 ω_0 和 μ_0 的表达式分别为

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{n_0 + n_1 + \dots + n_t}{M \times N} = \sum_{i=0}^t P_i \quad (2) \\ \mu_0 &= \frac{0n_0 + 1n_1 + \dots + tn_t}{n_0 + n_1 + \dots + n_t} \\ &= \frac{(0n_0 + 1n_1 + \dots + tn_t) / (M \times N)}{(n_0 + n_1 + \dots + n_t) / (M \times N)} \\ &= \frac{\sum_{i=0}^t iP_i}{\omega_0} \quad (3) \end{aligned}$$

灰度大于阈值 T 的像素个数为 N_1 ，它们在整幅图像中的比例为 ω_1 ，该区域的灰度均值为 μ_1 。 ω_1 和 μ_1 的表达式分别为

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{n_{t+1} + n_{t+2} + \dots + n_s}{M \times N} = \sum_{i=t+1}^s P_i \quad (4) \\ \mu_1 &= \frac{(t+1)n_{t+1} + \dots + (s-1)n_{s-1}}{n_{t+1} + \dots + n_s} \end{aligned}$$

$$= \frac{[(t+1)n_{t+1} + \dots + (s-1)n_{s-1}]/(M \times N)}{[n_{t+1} + \dots + n_s]/(M \times N)} \frac{\sum_{i=t+1}^{s-1} iP_i}{\omega_1} \quad (5)$$

整幅图像总体的灰度均值为

$$\begin{aligned} \mu_z &= \frac{0n_0 + 1n_1 + \dots + (s-1)n_{s-1}}{n_1 + n_2 + \dots + n_s} \\ &= \frac{0n_0 + 1n_1 + \dots + (s-1)n_{s-1}}{N} \\ &= \mu_0\omega_0 + \mu_1\omega_1 = \sum_{i=0}^{s-1} iP_i \end{aligned} \quad (6)$$

根据方差公式可以推出，两个区域的类间方差为

$$\sigma^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_z)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_z)^2 \quad (7)$$

通过对整幅图像进行逐点计算，使得类间方差 σ^2 达到最大值时的灰度阈值 A 为最佳阈值，即

$$A = \text{ArgMax}(\sigma^2) \quad (8)$$

利用阈值 A 将图像中的高温管道部分与背景分割开来。对原始红外图像使用图像减法，减去高温管道部分。此时，减掉部分的灰度变为 0，得到的就是去掉高温管道后的复杂背景图像。

对得到的复杂背景图像再进行一次上述运算。逐点进行类间方差的计算，得到使类间方差达到最大的值 B 。基于阈值 B ，可根据复杂背景图像中的灰度特征对干扰物与背景区域进行分割。

3 实验结果与分析

本文在美国 Altera 公司生产的 DE2-115 开发板上对基于细胞免疫的 Otsu 算法进行了实验研究。实验样本为现场拍摄的多幅管道红

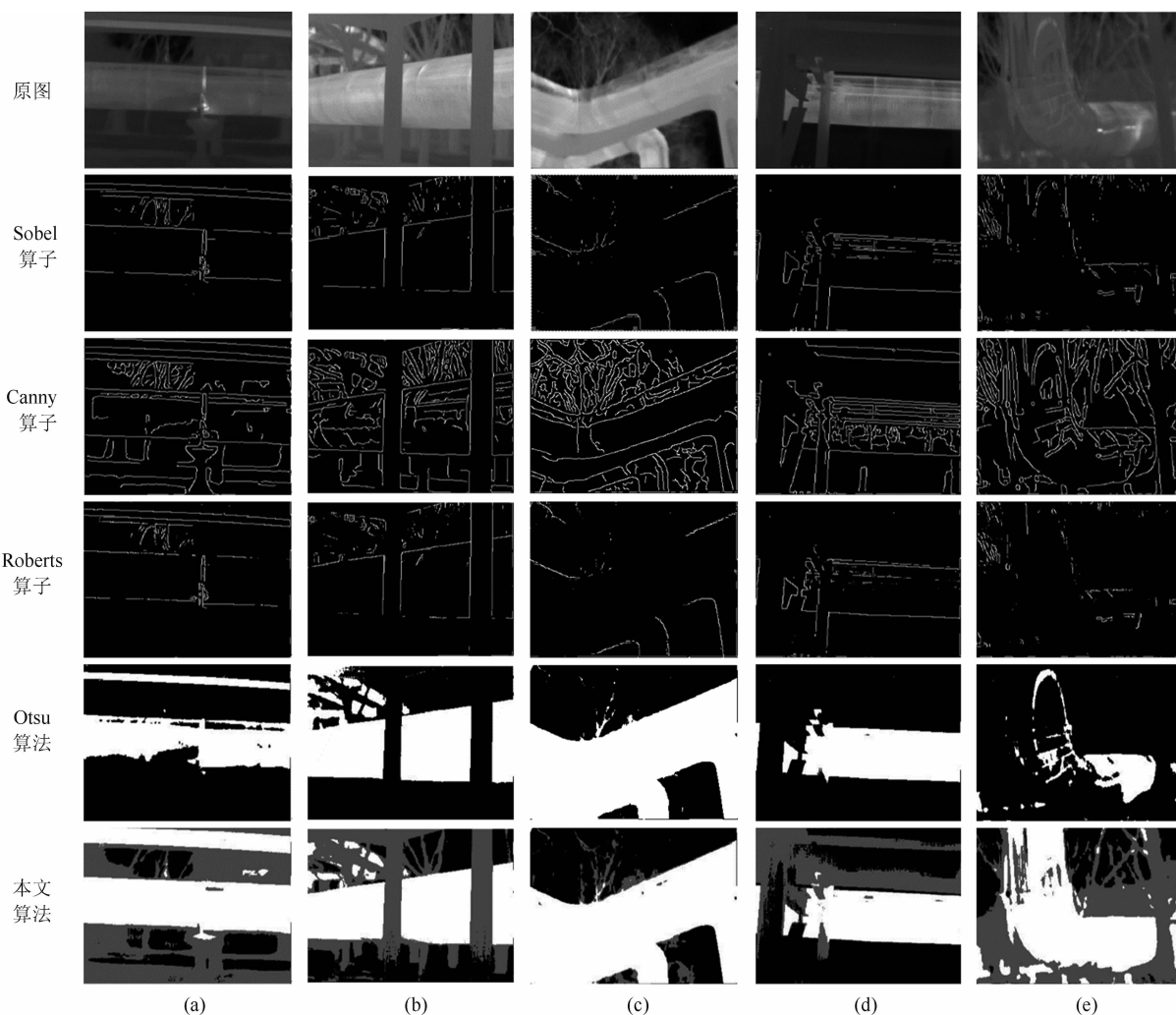


图 3 实验结果对比

外图片。将实验结果与多种边缘检测算子及经典 Otsu 算法进行了比较(结果见图 3)。

从图 3 中可以看出, Sobel 算子和 Roberts 算子都只能简单勾勒出图像的一部分轮廓; Canny 算子能完整勾勒出图像中管道与干扰物(树枝)的轮廓, 但无法将管道与背景中的树枝进行区分; Otsu 算法能够将图像中的管道部分分割出来, 但是没能对背景中的干扰物部分完成分割; 本文算法不仅能够准确地将管道从图像中分割出来, 而且还能提取出复杂背景中的干扰物, 即有效地将管道与干扰物进行区分。

为了检测图像分割的准确度, 本文采用真阳性率作为评价标准。真阳性率越高, 算法分割的目标区域同实际区域的重合度越大, 即分割效果越好; 假阳性率越低, 算法分割的目

标区域中的误分部分就越少(与实际目标区域相比), 即分割效果越精确。由于本文算法将图像分为管道、干扰物和背景三部分, 我们分两次检测真假阳性率: 一次针对管道, 另一次针对复杂背景中的干扰物。

表 1 和表 2 分别列出了针对管道以及复杂背景中干扰物的真假阳性率评价指标。可以看出, Sobel、Canny 和 Roberts 算子的真阳性率较低, 说明边缘检测算法在管道提取方面的表现不太好。Otsu 算法在管道提取方面虽然有着较好的表现, 但是在提取背景中的干扰物时却不尽如人意。此时, 真阳性率不高, 而假阳性率较高, 说明该算法无法准确定位干扰物, 而且误选区域较多。本文算法在检测管道目标和提取目标背景中的干扰物时都具有较高的真阳性率和较低的假阳性率, 说明该算法不仅能

表 1 管道的真假阳性率数据分析表

图像	指标	Sobel	Canny	Roberts	Otsu	本文算法
a	TPR	0.7358	0.7462	0.7360	0.9097	0.9844
	FPR	0.0163	0.0641	0.0141	0.0000	0.0000
b	TPR	0.7604	0.7772	0.7584	1.0000	0.9909
	FPR	0.0196	0.0658	0.0206	0.0364	0.0000
c	TPR	0.6747	0.6903	0.6745	1.0000	0.9980
	FPR	0.0203	0.1243	0.0190	0.0174	0.0000
d	TPR	0.8311	0.8487	0.8289	1.0000	0.9991
	FPR	0.0148	0.0379	0.0151	0.0083	0.0000
e	TPR	0.7126	0.7101	0.7358	0.7720	0.9511
	FPR	0.0230	0.0190	0.0782	0.0000	0.0000

表 2 干扰物的真假阳性率数据分析表

图像	指标	Sobel	Canny	Roberts	Otsu	本文算法
a	TPR	0.7610	0.7742	0.7610	0.7558	0.9870
	FPR	0.0291	0.0663	0.0275	0.4612	0.0851
b	TPR	0.7021	0.7114	0.7023	1.0000	0.9681
	FPR	0.0388	0.1160	0.0334	0.2280	0.0328
c	TPR	0.8618	0.8789	0.8615	0.8621	0.8960
	FPR	0.0129	0.0740	0.0123	0.6953	0.0041
d	TPR	0.6796	0.6884	0.6820	0.6796	0.8497
	FPR	0.5479	0.1008	0.0262	0.5479	0.0020
e	TPR	0.7582	0.7698	0.7579	0.7555	0.9541
	FPR	0.0322	0.1099	0.0233	0.1724	0.1519

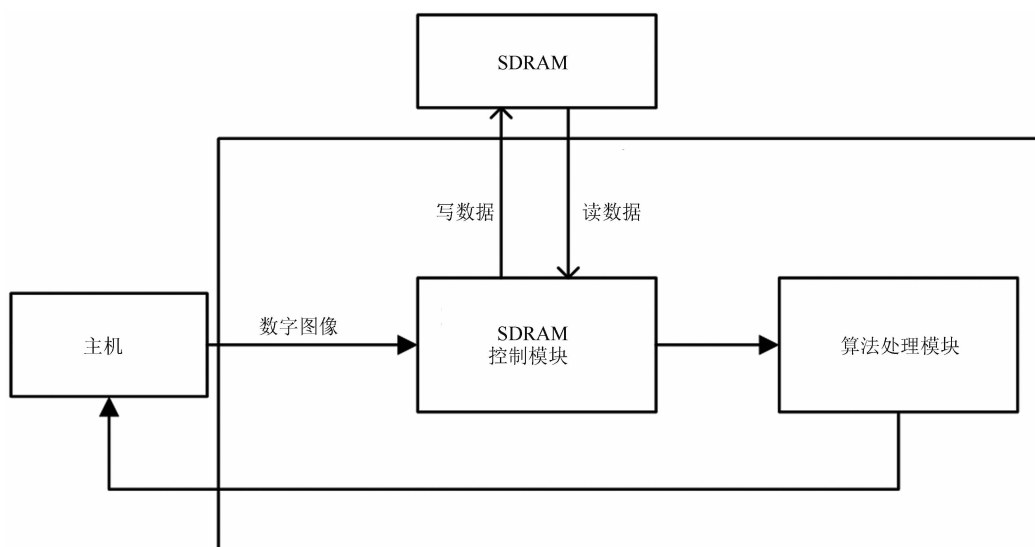


图4 系统结构图

准确地对管道进行定位和提取，而且还能够很好地对复杂背景进行区分。

4 算法的硬件实现

该系统利用FPGA作为核心处理器来对图像进行算法处理。首先，通过主机将数字图像传输到SDRAM控制模块。该模块用于控制SDRAM来存储所接收的图像数据。然后将这些数据发送到算法处理模块进行处理，并将处理后的图像数据传回主机。主机与FPGA之间的通信通过串口调试软件实现。系统结构图如图4所示。

4.1 数据传输模块

主机与FPGA之间的通信通过RS-232接口以及串口调试软件(见图5)实现。该软件具有发送待处理图片和接收已处理图片的功能，并且能保存接收到的图片。利用串口调试软件将图片从主机传输到FPGA中进行算法处理，然后再将其传回主机。

4.2 SDRAM控制模块

在FPGA进行图像处理的过程中，接收数据的速度和FPGA的处理速度往往不一致，这就需要对接收到的数据进行缓存。本文采用SDRAM作为图像数据的缓存介质，并使用SDRAM控制器对其进行控制。作为数字图像数据缓存的控制结构，SDRAM控制器操作简

单，包括初始化和读写操作两部分。

4.3 算法处理模块

算法处理在FPGA中实现。首先，将管道红外图像转换成灰度图像，并计算出整个图像上的像素数以及每个灰度发生的概率。根据图像中每个点的灰度值，逐点计算类间方差，并判断它是否为最大值。如果该类间方差是最大值，则输出灰度值，即阈值 T_1 。在计算 T_2 时，将整个图像中每个点的灰度值与 T_1 进行比较，然后将上述算法应用于所有灰度值小于 T_1 的点，得到阈值 T_2 。

5 总结

随着图像处理技术的进步和发展，在管道红外图像的处理过程中，不仅要准确地从复杂背景中提取目标管道，还要对复杂背景进行区分，且图像数据的处理速度和数量也要满足一定的要求。将传统的Otsu算法与细胞免疫机制相结合，针对图像不同的特征得到不同的阈值，并将它们分别用于图像中不同目标的提取。实验结果表明，该算法解决了复杂背景的认识问题，且具有较强的针对性和显著的效果。通过将写入算法的FPGA作为核心处理器来处理图像，可以同时快速处理大量的红外图像，也更易于实际工程应用。未来可将本文算法与无人机技术相结合，利用FPGA对无人机



图 5 串口调试软件界面

拍摄的照片进行实时处理, 进一步提高工作效率和工作人员的人身安全。

参考文献

- [1] 王坤, 吉尧, 刘沛伦, 等. 基于 Otsu 和改进易经占卜进化算法的红外图像分割 [J/OL]. *系统仿真学报*: 1-13. [2020-04-10]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0455>.
- [2] 倪伟传, 许志明, 刘少江, 等. 复杂环境下的自适应红外目标分割算法[J]. *红外技术*, 2019, **41**(4): 357-363.
- [3] 李文杰, 夏海英, 刘超. 融合 RSF 模型及边缘检测 LOG 算子的图像分割方法的研究 [J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2018, **38**(2): 98-102.
- [4] 姜慧研, 冯锐杰. 基于改进的变分水平集和区域生长的图像分割方法的研究 [J]. *电子学报*, 2012, **40**(8): 1659-1664.
- [5] 陆振宇, 邱雨楠, 傅佑, 等. 基于小波变换和粒子群改进的 FCM 图像分割方法 [J]. *现代电子技术*, 2019, **42**(5): 57-60.
- [6] Huang D Y, Wang C H. Optimal multi-level thresholding using a two-stage Otsu optimization approach [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**(3): 275-284.
- [7] Bhandari A K, Kumar A, Singh G K. Modified artificial bee colony based computationally efficient multilevel thresholding for satellite image segmentation using Kapur's, Otsu and Tsallis functions [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, **42**(3): 1573-1601.
- [8] Elaziz M A, Bhattacharyya S, Lu S F. Swarm selection method for multilevel thresholding image segmentation [J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, **138**: 112818.
- [9] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 2007, **9**(1): 62-66.
- [10] Elgueta R, Benson M J, Vries V C D, et al. Molecular mechanism and function of CD40/CD40L engagement in the immune system [J]. *Immunological Reviews*, 2009, **229**(1): 152-172.
- [11] West A P, Shadel G S, Ghosh S. Mitochondria in innate immune responses [J]. *Nature Reviews Immunology*, 2011, **11**(6): 389-402.
- [12] Wilson D S, Hirose S, Raczky M M, et al. Antigens reversibly conjugated to a polymeric glyco-adjuvant induce protective humoral and cellular immunity [J]. *Nature Materials*, 2019, **18**(2): 175-185.
- [13] 马兴铭, 丁剑冰. *医学免疫学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [14] 曹雪涛. 免疫学研究的发展趋势及我国免疫学研究的现状与展望 [J]. *中国免疫学杂志*, 2009, **25**(1): 10-23.