

文章编号: 1007-2780(2012)06-0814-06

基于 NIOS II 的红外弱小目标检测算法实现

穆治亚^{1,2}, 魏仲慧¹, 何 昕^{1*}, 梁国龙¹, 林为才¹

(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, E-mail: mufeng9@sina.com;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 介绍了基于可编程片上系统 SOPC 技术的图像处理系统的软硬件设计, 系统采用 FPGA 作为视频信号采集控制模块, 利用 FPGA 内建 NIOS II 软核微控制器作为图像处理单元。针对天空背景下红外弱小目标, 提出了一种基于形态学和仿生学相结合的图像预处理算法, 该算法在基于数学形态学滤波的基础上利用人眼固视微动辨别信息的原理对图像进行背景抑制和目标增强; 采用自适应阈值分割法确定目标。硬件实验结果表明系统实时性好, 图像处理效果良好, 目标检测率高, 验证了预处理算法的有效性和实时性。

关 键 词: 目标检测; 红外图像; NIOS II; 固视微动

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122706.0814

Design of Dim-Small Target Detection on Infrared Image Based on NIOS II

MU Zhi-ya^{1,2}, WEI Zhong-hui¹, HE Xin^{1*}, LIANG Guo-long¹, LIN Wei-cai¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: mufeng9@sina.com;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This research introduces the software and hardware design of an image processing system based on the System On Programmable Chip (SOPC) technology. This system adopts FPGA as the Video signal acquisition control module, using the internally embedded NIOS II soft-core microcontroller of FPGA as the image processing unit. Aiming at the infrared dim-small target with sky background, a novel image pre-processing algorithm is proposed based on morphological and combination of bionics. The proposed algorithm based on mathematical morphology filter used the principle of solid visual budge of human eye to enhance targets and suppress background which adopts the adaptive threshold segmentation method to detect the target. According to the results after the hardware implementation, this system is apparently real-time, the performance of the image processing is effective and the target detecting is accurate. The effectiveness and real-time characters of the algorithm is proved.

Key words: target detection; IR image; NIOS II; solid visual budge

收稿日期: 2012-03-10; 修订日期: 2012-03-30

作者简介: 穆治亚(1985—), 男, 山西晋中人, 博士研究生, 主要从事光电测量及数字图像处理方面的研究。

* 通讯联系人, E-mail: hexin6627@sohu.com

1 引言

红外搜索系统因其良好的抗电子干扰、无源探测目标和全天时工作的能力已经广泛应用于现代光电对抗战中,是现代光电和红外技术在军事上的典型应用。红外弱小目标的检测是反映红外搜索系统对目标识别能力的一项关键技术。因此,如何在满足实时性要求的前提下,实现检测率高,虚警率低的目标检测方法具有十分重要的军事意义。

通常对于红外弱小目标的检测应分为两个步骤:首先需要在单帧图像确定候选目标;其次利用序列图像来确认真实的目标。单帧红外图像目标检测的关键步骤是背景抑制与目标增强。针对此关键步骤国内外采用的方法包括均值滤波^[1]、中值滤波^[1]、维纳滤波^[2]、数学形态学滤波^[2]、最小均方与最小二乘以及神经网络^[2]等。其中数学形态学及其若干改进算法在处理的效果和速度上都占有优势且易于硬件实现。本文提出一种将形态学与仿生学相结合的基于数学形态学滤波的固视微动算法来处理单帧红外图像,使用自适应分割法对处理后的图像进行阈值分割,最后通过帧间差法确认真实目标。

针对基于 PC 机的图像处理系统实时性不强,以及 FPGA+DSP 架构成本高,DSP 外围资源浪费等问题,利用 FPGA 强大的并行处理数据能力和丰富的逻辑资源,结合 NIOS II 软核控制器丰富的外设接口,设计了基于 NIOS II 的红外弱小目标检测系统。

2 系统硬件结构

系统结构如图 1 所示,主要由红外相机、SDRAM 存储器、FPGA 芯片、Camera Link 接口、图像采集卡等构成。其中相机基于法国 Sofradir 公司中波 FPA 探测器,图像输出分辨率为 320×240 ,频率为 24 帧/s,FPGA 采用 Altera 公司的 Cyclong II 系列,该芯片具有性能强功耗低的特性,设计采用 FPGA 配置芯片为 EPCS16,用于存储 FPGA 硬件配置数据。SDRAM 采用 IS2S16160B。

首先,红外相机采集红外图像,数字信号通过 Camera Link 传送至 FPGA,FPGA 对图像进行乒乓操作存入 SDRAM,FPGA 内部的 NIOS II 图

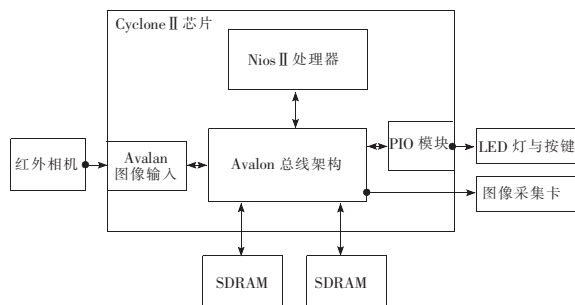


图 1 系统硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure of the system

像处理单元对图像进行预处理,目标检测,阈值分割等一系列算法,最后将处理后的图像经 Camera Link 送至图像采集卡进行采集,观察。

3 目标检测算法

天空背景下的目标反映在图像上都是背景较亮的孤立区域,占据图像的高频分量,而大面积平缓变化的背景则占据低频分量。天空背景下的红外图像虽然没有复杂的物体背景,但是天空中大气和云层的变化极易在图像中产生杂波干扰,因此单一使用形态学滤波不能很好地克服杂波的干扰,而从人眼的固视微动特性出发则可以有效地改进形态学滤波的处理效果。

3.1 数学形态学滤波

数学形态学^[3]目前广泛应用于图像处理领域,其基本思路是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状。数学形态学包含 4 个基本操作:腐蚀,膨胀,开启和闭合运算。4 种基本运算的定义如下。

设 A 和 B 是 Z^2 中的集合, A 被 B 膨胀定义为:

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (1)$$

集合 B 通常叫做结构元素,式(1)中 \hat{B} 是集合 B 的反射,定义为:

$$\hat{B} = \{\omega \mid \omega = -b, b \in B\} \quad (2)$$

$(B)_z$ 表示集合 B 平移到点 z ,定义为:

$$(B)_z = \{c \mid c = b + z, b \in B\} \quad (3)$$

使用 B 对 A 进行腐蚀的定义为:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad (4)$$

结构元素 B 对 A 分别进行开运算和闭运算的定义为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (5)$$

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (6)$$

Top-hat 算子是近来被广泛应用于背景抑制的形态学中的一种滤波算子,其滤波效果具有高通滤波的某些特性。设 $f(x, y)$ 是原始灰度图像, b 是结构元素,经典 Top-hat 算子定义式为:

$$TH(f) = f - (f \circ b) \quad (7)$$

由于进行开运算过程中不但清除了小目标,同时也清除了大量的噪声点,因此相减结果中包含大量噪声。一种改进型的 Top-hat 算子滤波方法可以有效去除噪声,其定义式为:

$$TH^*(f) = (f \circ b_1) - (f \circ b_2) \quad (8)$$

式中 b_1 是较目标尺寸小的结构元素,而 b_2 是较目标尺寸大的结构元素,这样用 b_1 对原图像进行开操作后,仅仅是小的噪声点被平滑掉,小目标仍然被保留,经过相减操作后可以有效地达到背景抑制和目标增强的效果。但是这种算法的不足之处在于增加了一次开运算,使算法复杂度提高,而且当目标尺寸与噪声块尺寸相差不大时,很难选取结构元素 b_1, b_2 。

3.2 固视微动(Solid Visual Budge)算法原理

1952年, Ditchburn^[4]和 Ginsborg 第一次以论文的形式阐述了人眼在固视状态下具有无意识的微小运动,即发现了人眼的固视微动。固视微动^[5]的成像原理可以归纳为人的眼球靠振颤、漂移和闪动使近凹区反应增强,通过不断的微动进行修正从而精确地辨认出目标。将人眼固视微动的思想应用于红外图像处理,将获得的灰度图像模拟人眼进行微动调制,可以获得对目标增强的效果。原始灰度图像 $f(x, y)$ 经固视微动调制后的图像 $g_\alpha(x, y)$ 可以用差分方程的形式表示为:

$$g_\alpha(x, y) =$$

$$|f(x, y) - f(x + k_1 \cdot \Delta x, y + k_2 \cdot \Delta y)| \quad (9)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向上移动的距离单元; k_1, k_2 为整数表示移动单元的个数; α 为微动的运动方向

$$\alpha = \arctan \frac{k_2}{k_1} \quad (10)$$

固视微动法虽然能够对红外图像进行背景抑制,但是直接对原始灰度图像进行微动调制会留下噪声干扰等引起的虚假目标。

3.3 基于形态学滤波的 SVB 检测算法

从形态学和仿生学相结合的角度出发,根据

数学形态学滤波算法和 SVB 算法各自的特点,提出一种新的基于形态学滤波的 SVB 检测算法。参考公式(7)(9)给出新算法定义式如下:

$$h_\alpha(x, y) = |TH(f) - (f - (f \circ b)) \times (x + k_1 \Delta x, y + k_2 \Delta y)| \quad (11)$$

新算法是在数学形态学滤波的基础上利用人眼固视微动分辨事物的原理处理红外图像,公式中虽然用到了两次形态学开运算的操作,但两次开运算是相同的重复操作,实际运算中只需一次开运算并保留中间结果即可,由于 SVB 法的时间要远远小于形态学开运算,因此新算法的复杂度几乎和传统的形态学算法相同,在实时性上得到了保证,阈值分割采用传统的 Otsu 自适应阈值分割算法。

Otsu 算法的步骤如下:

(1) 设图像包有 L 个灰度级 $(0, 1, \dots, L-1)$, 灰度值为 i 的像素点数为 N_i , 图像总的像素点数为 N 。灰度值为 i 的点的概率为:

$$P(i) = N_i / N \quad (12)$$

(2) 阈值 t 将待处理图像分为暗区 C_1 和亮区 C_2 , 则类间方差 σ 是 t 的函数:

$$\sigma = A_1 \times A_2 (U_1 - U_2)^2 \quad (13)$$

式中 A_j 为类 C_j 的面积与图像总面积之比, U_j 为类 C_j 的均值 ($j=1, 2$)。

(3) 选择最佳阈值 t 使类间方差最大, 即:

$$\sigma_b = \text{Max}\{A_1(t) A_2(t) (U_1 - U_2)^2\} \quad (14)$$

4 FPGA 模块设计

在 FPGA 内部没采用模块化的设计思想, 通过 Verilog 语言实现各个功能模块, 主要有图像采集模块、SDRAM 存储模块、图像处理模块等。

4.1 图像采集模块

图像采集模块负责采集动态图像数据, 并输出分辨率为 320×240 的 8 位红外图像, 其图像采集速度为 24 帧/s, 工作频率为 25 MHz。图像采集模块采用 Camera Link 接口进行数据传输。

Camera Link 是一种适合数字图像信号在相机与图像采集卡间传输的接口协议。是由国家半导体公司 National Semiconductor 提出, 基于 Channel Link 技术标准发展而来的, 该接口具有开放式的接口协议^[6]。Camera Link 接口协议以 LVDS(低压差分信号)来完成相机和图像采集卡的数据传输和通信, 并定义了标准的接口器件。

后用结构算子与其覆盖的二值图像做“与”操作,最后将“与”结果依次存入 FIFO1 中,所得结果即为腐蚀图像。其中 data_in 为数据输入, f1oclk1 和 f1oclk2 为 FIFO 的输入时钟, WR 和 RD 为读写控制信号,具体设计如图 2 所示。显然当输入数据为 0 时,将导致 9 个 0,从而实现了腐蚀功能。膨胀模块和腐蚀模块大致相同,只是将相应的“与”操作改为“或”操作即可。

新算法是提取两次开运算后的数据结果,将其中一组结果按照公式(11)即 SVB 原理进行调制图像,然后将两组数据进行相减,并取绝对值。最后采用自适应阈值分割法对预处理后的图像进行二值化确定目标。具体的检测流程图如图 5 所示。

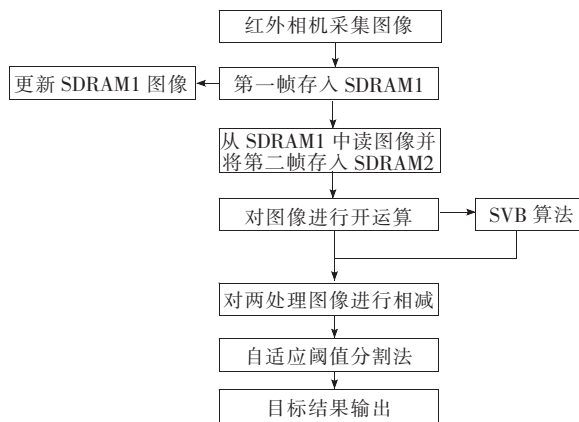


图 5 目标检测流程图

Fig. 5 Flow chart of target detection

5 实验结果

本实验在 Altera 公司的 QuartusII 软件平台上,通过 JTAG 模式将整个系统模块程序下载到 Cyclone II 中进行在线调试。利用红外相机对天空中的目标实时成像,图像分辨率为 320×240 ,采集速度为 24 帧/s,经 FPGA 实时处理后经过 Camera Link 送至 PC 机上的图像采集卡(DVR Express CL160)上显示,本实验用到的图像采集卡是由加拿大 IO Industries 公司生产的一款针对 Camera Link 接口的图像采集卡,支持对 Camera Link 传输的单/彩色视频的采集。图 6 为图像处理板卡,图 7 为采集到的其中一帧图像,图 8 为基于形态学滤波的 SVB 算法处理后的实验效果图,图 9 为阈值分割后的实验效果图。基于形态学滤

波的 SVB 算法处理前后图像结果分析如表 1 所示。



图 6 图像处理板卡

Fig. 6 Image processing board

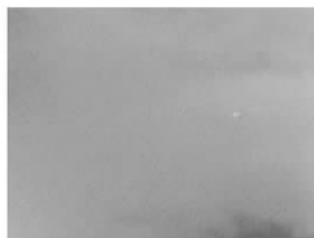


图 7 原图像

Fig. 7 Original image



图 8 基于形态学滤波的 SVB 算法

Fig. 8 SVB algorithm based on morphology

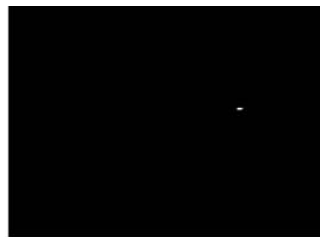


图 9 阈值分割后的图像

Fig. 9 Processing result image

表 1 形态学滤波的 SVB 算法处理前后图像分析
Table 1 Analysis of original image and after process

	原图像	SVB 处理后图像
信噪比	0.81	2.56
对比度	5.32	11.89

6 结 论

设计了一种基于 NIOSII 的红外弱小目标检测系统,提出了一种应用于红外搜索系统的天空背景下弱小目标的检测算法。将形态学方法与仿生学方法相结合,改进了传统的形态学滤波方法

和人眼固视微动算法,并将该算法在 FPGA 硬件平台上实现。实验结果表明,该算法能够很好地检测出天空背景下的红外弱小目标,而且算法实时性好,易于硬件实现,满足对空红外检测算法方面的要求。

参 考 文 献:

[1] 同武勤,凌永顺,黄超超,等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法 [J]. 光学 精密工程,2007,15(1): 138-144.

[2] 李乔亮. 复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述 [J]. 红外技术,2006,(5):287-290.

[3] 刘辉, 赵文杰, 吴畏. 基于人眼微动机理的红外图像边缘提取 [J]. 微型机与应用,2010,29(20):56-58.

[4] 吴爽, 刘峥, 刘钦. 基于数学形态学的红外图像预处理算法分析 [J]. 制导与引信,2010,31(4):20-24.

[5] 许建忠, 王祖林, 赵毅寰, 等. 红外序列图像弱小目标检测的研究 [J]. 光学技术,2010,36(3):460-463.

[6] 冉峰,杨辉,黄舒平. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计 [J]. 光学 精密工程,2010,18(1):273-280.

[7] 张传胜. 基于 FPGA/SOPC 架构的面阵 CCD 图像采集系统的设计 [J]. 液晶与显示,2011,26(5):636-639.

[8] 陈伦海,黄君凯,杨帆. 基于 FPGA 的实时边缘检测系统 [J]. 液晶与显示,2011,26(2):200-204.



SI 词头

代表的因素	词头名称		符号	代表的因素	词头名称		符号
	英文	中文			英文	中文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y	10^{-1}	deci	分	d
10^{21}	zetta	泽[它]	Z	10^{-2}	centi	厘	c
10^{18}	exa	艾[可萨]	E	10^{-3}	milli	毫	m
10^{15}	peta	拍[它]	P	10^{-6}	micro	微	μ
10^{12}	tera	太[拉]	T	10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^9	giga	吉[咖]	G	10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^6	mega	兆	M	10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^3	kilo	千	k	10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^2	hecto	百	h	10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^1	deca	十	da	10^{-24}	yocto	幺[科托]	y