

复杂背景下红外小目标实时识别方法研究

郑文龙 张涌 汤心溢 吴常泳

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 提出一种用于红外警戒系统复杂背景下红外小目标实时识别的方法, 该方法采用 FPGA 实时二维数字滤波、高速 DSP 微处理器并行处理结构、基于运动分析的目标识别算法, 不仅改善了复杂背景下微弱运动目标的捕获能力, 实现了运动多目标自动识别, 还具有预计目标遮掩及实现目标再捕获的能力。系统处理速度达 25 f/s, 系统反应时间小于 1s。

关键词 红外警戒系统, 空间滤波, 图像配准。

REAL-TIME RECOGNITION OF INFRARED SMALL TARGETS IN COMPLICATED IR BACKGROUND

ZHENG Wen-Long ZHANG Yong TANG Xin-Yi WU Chang-Yong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A new method for infrared (IR) warning system to recognize small targets in IR image sequences in real time in complicated IR background was presented. The system employs two-dimensional digital filtering using Field Programmable Gate Array (FPGA), parallel processing of high speed Digital Signal Processor (DSP) and target recognition algorithm based on target movement analysis. The system not only improves dim moving target capture capability in complicated background, accomplishes moving multi-target automatic recognition, but also is capable of target overlapping prediction and target recapture. The system processing rate reaches 25 frames per second, and the system responding time is less than 1 second.

Key words IR warning system, spatial filtering, image registration.

引言

红外警戒系统由于具有被动探测、能夜间工作等优点, 在现代高科技中起着越来越大的作用。在系统设计时, 除了要求高质量的光机系统、高性能的探测器组件外, 图像信号处理与目标自动识别是非常关键的部分。

在自然环境中, 目标和背景的成像条件是不可控制的, 随机变化的因素和背景信息给目标检测识别带来很大的困难。主要表现在: 一是在实际应用中, 目标在整幅图像中所占的比例往往是比较小的, 而且背景信息往往比目标信息更复杂。二是在低信噪比条件下, 在目标运动特性未知或可能的取值范围较大的情况下, 实现目标识别需要的计算量太大。

为了克服上述因素造成的识别困难, 本文采用

一种基于运动分析的快速目标识别的算法, 结合空间数字滤波、帧间分析、综合决策等先进技术, 采用高速 DSP 微处理器、大规模可编程门阵列 (FPGA) 组成实时的并行处理结构, 能直接接收、处理红外视频信号, 给出搜索信息, 并研制了自动实时的红外小目标识别系统。

1 基本原理及系统构成

红外警戒系统的整个处理过程, 一般可以分为背景杂波抑制、目标图像分割、目标识别 3 大部分 (见图 1)。

红外警戒系统获取的背景成分复杂, 有云层的热辐射、太阳闪光、地面、地形和建筑物的干扰, 这些干扰不仅强度大, 而且具有较强的空间结构。这就要求系统具有抗复杂背景的能力。

背景杂波抑制部分主要由空间数字滤波实现^[1]。数字滤波器采用非线性非参数型 Robinson Guard^[2] 滤波器 (Robinson filter with a guard band) 完成背景杂波的抑制。目标图像分割部分实现潜在目标块的自适应提取。目标识别部分对已分割的目标块进行聚类,并完成目标的初级分类,根据记录的目标历史数据进行目标的运动分析和动力鉴别,最终作出决策。

1.1 空间滤波

红外警戒系统获取的图像是低对比度、低信噪比的弱目标图像。系统探测的目标具有尺寸小、运动轨迹连续、平滑的特点。目标图像的像素尺寸通常小于 55。

空间数字滤波完成背景杂散干扰的抑制,可提高目标探测的信噪比。滤波器通过检测给定的像素判定是否有目标存在,这就需要被检测像素周围像素的信息。通常考虑用 m/n 矩形滤波算子来检测特定的像素。为了保留一部分杂波子集,我们使用保护带(guard band)来实现。这些保留的杂波子集是靠近目标像素的周围像素,它们的几何特征跟目标像素有关联。通过比较不同的空间滤波器滤波效果,本系统采用非线性非参数型 Robinson Guard 滤波器 (Robinson filter with a guard band) 完成背景杂波的抑制。Robinson Guard 滤波器可认为是一种增强的边缘滤波器,所不同的是,普通边缘滤波器只给出目标边缘信息而滤除了目标内部信息,而 Robinson Guard 滤波器由于具有保护带,在目标不太大的情况下能给出目标的完整信息。本系统采用的滤波器尺寸为 7×7 ,保护带宽度为 2,对最大为 $3 \cdot 3$ 的目标不失真,其形式如下

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
Z8						Z9
Z10						Z11
Z12			X			Z13
Z14						Z15
Z16						Z17
Z18	Z19	Z20	Z21	Z22	Z23	Z24

算法为

$$X = \begin{cases} X - \max(Z_i), & X \geq \max(Z_i) \\ X - \min(Z_i), & X < \min(Z_i) \\ 0, & \min(Z_i) < X < \max(Z_i) \end{cases} \quad (1)$$

鉴于红外视频信号的高数据率,背景杂波抑制模块采用全硬件的方法实现。两维的空间数字滤波 Robinson Guard 滤波器选用 FPGA (Field Programmable Gate Array) 芯片为主处理单元完成。该处理模块的主要特点为:适应高速实时的数据处理能力;FPGA 芯片可实现现场编程,更改处理算法无须重新设计线路板;FPGA 芯片的高集成度可大大缩小系统体积,提高可靠性。

1.2 图像分割

目标块分割根据局部窗口内的背景强度、背景梯度及目标强度等信息,采用自适应算法进行门限阈值的调整,完成目标数据块与背景信号的分离。通常,每个目标块在被检测时都应该标以序号,该序号用以识别和跟踪目标。本系统采用线段编码对分割图像进行结构化,从而提取每个目标块。线段编码是用来存储被提取目标的一种逐行处理技术,该方法的优点在于所需 RAM 小、运算量小、速度快。假设我们用灰度级阈值 T 来分割图像,程序从顶部开始

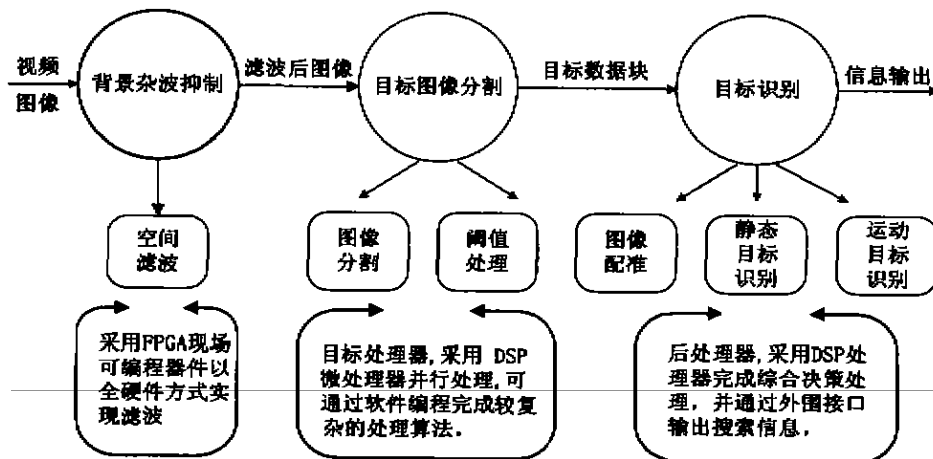


图 1 信号处理器硬件结构图

Fig. 1 The hardware structure of the signal processing system

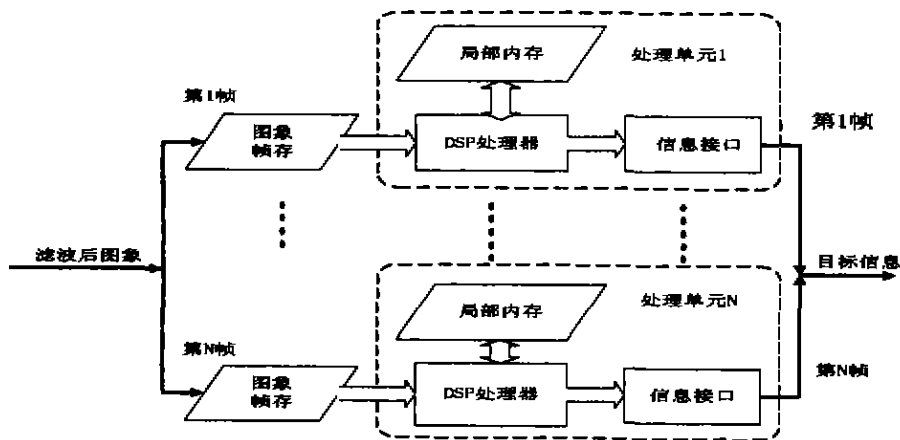


图 2 多 DSP 并行处理原理图
Fig. 2 Multi-DSP parallel processing architecture

逐行检测图像,寻找灰度级大于或等于 T 的像素.单扫描线段编码技术的结果是一个段文件集,目标块段文件在局部 RAM 中被编制.

该模块采用 DSP (Digital Signal Processor) 处理器为主处理单元,通过软件编程可以灵活地完成图像分割处理算法.由于系统处理速度要求达到 25 f/s,为此采用 4 个 DSP 微处理器并行工作,输入图像逐帧分配给各 DSP 处理单元,每个处理单元拥有 4 帧的时间进行目标处理,其原理框图见图 2.

1.3 目标识别

目标识别模块包括图像配准^[3]、静态目标识别^[4]和运动目标识别^[5]3 部分.图像配准用于消除运动平台的影响,从而实现目标的帧间分析.静态目标识别是为了检测在连续几帧中出现的静态目标.运动目标识别是为了检测图像序列中出现的运动目标.

目标识别模块的主要硬件框图见图 3.它以 DSP 微处理器为主控制器,通过高速信息缓存接口接收来自目标处理器的信息,并进行后续处理.目标识别算法通过软件编程来完成.

1.3.1 图像配准

图像配准用于消除运动平台的影响,实现当前帧与搜索帧的精确匹配.图像配准采用块匹配法.块匹配的基本思想如图 4 所示,其中帧 k (当前帧)中的像素 (n_1, n_2) 的位移通过考虑中心定位在 (n_1, n_2) 的 $N_1 \times N_2$ 块,同时搜索帧 k+1 (搜索帧)来找出同样大小的最佳匹配块的位置来确定.一般的,搜索限制在 $(N_1 + 2M_1) \times (N_2 + 2M_2)$ 范围内 (搜索窗).系统选用图像不同位置处多个搜索窗,以此提高精确

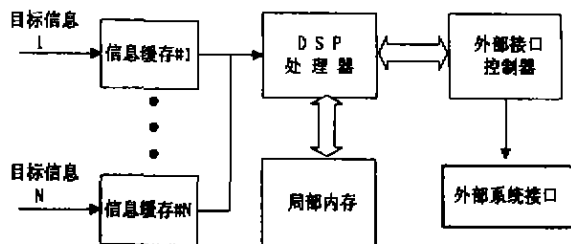


图 3 目标识别模块硬件结构图
Fig. 3 The hardware structure of target detection module

度.其中 $M_1 = M_2 = 7, N_1 = N_2 = 9$.

块匹配的匹配准则采用最小平均绝对差值函数 (MAD),如公式 (2) 所示:

$$MAD(d_1, d_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{(n_1, n_2) \in B} |s(n_1, n_2, k) - s(n_1 + d_1, n_2 + d_2, k + 1)|, \quad (2)$$

式 (2) 中 B 代表 $N_1 \times N_2$ 块, d_1, d_2 为块 B 位移矢量分量, $S(n_1, n_2, k)$ 为离散时空图像.于是,位移估算由下式给出:

$$[\hat{d}_1, \hat{d}_2]^T = \arg \min_{d_1, d_2} MAD(d_1, d_2). \quad (3)$$

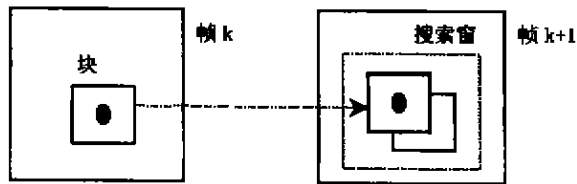


图 4 块匹配原理图
Fig. 4 Block-matching principle

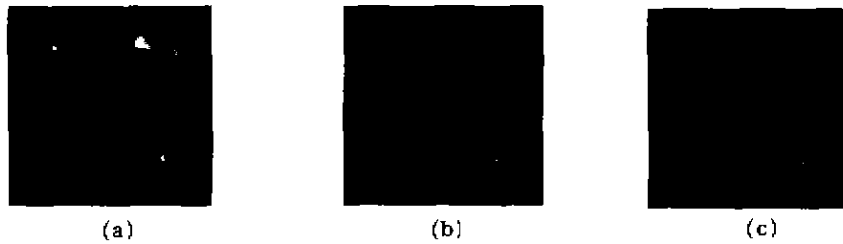


图5 连续红外图像序列处理结果

(a) 输入图像 (b) 杂波抑制后图像 (c) 目标识别后图像

Fig. 5 Processing results of continuous infrared image sequence

(a) input image (b) image after clutter rejection (c) image after target recognition

1.3.2 目标识别

静态目标识别是为了检测在连续几帧中出现的静态目标. 静态目标识别主要是决定其位置坐标, 其信息量比较少, 一般无法完全由单帧图像来检测, 必须通过帧间分析来确定. 判别静态目标的主要依据是: (1) 在连续图像序列中目标块是否存在; (2) 目标块在强度上有无差别; (3) 目标块尺寸有无差别.

由于系统的作用对象主要是运动目标, 故目标的运动特性(尤其是逼近速度)是危险等级鉴别分类的主要依据. 因系统不具有测距功能, 目标的径向逼近速度只能根据目标强度的变化率进行估计, 见式(4)~式(7). 在径向速度和命中时间估算中, 采用单帧计算将会有较大误差, 因此采用多帧数据平滑、多点拟合的方法来提高估值的精度. 目标的运动速度是鉴别目标有无动力的主要依据, 若目标的运动速度、加速度超过某一门限阈值, 则判定其有动力, 由此可更好地区分目标.

$$H = J \cdot \tau(R) / R^2 \propto C \cdot R^{-2+\rho}, \quad (4)$$

$$\frac{\Delta H}{H} = -(2+\rho) \cdot \frac{\Delta R}{R}, \quad (5)$$

$$\frac{V_r}{R} = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} = \frac{-1}{-(2+\rho) \cdot \Delta T} \cdot \frac{\Delta H}{H}, \quad (6)$$

$$TTI = R / V_r = -(2+\rho) \cdot \Delta T \left/ \frac{\Delta H}{H} \right., \quad (7)$$

式(5)~(7)中 H 为目标强度, V_r 为目标径向速度, ΔT 为帧间时间间隔, TTI 为目标命中时间, ρ 为随高度和仰角变化的函数, $0 < \rho < 1$.

2 实验结果

在实验中, 采用飞机场拍摄的红外图像进行测试. 输入图像大小为 256×256 像素, 帧频为 25 f/s . 系统对连续红外图像序列进行处理, 其结果如图5所示: 图5(a)为原始图像, 其中左上角和右下角亮点为目标; 图

5(b)为杂波抑制后图像, 右上角多出两个噪声点; 图5(c)为目标识别后图像, 噪声点被滤除.

通过多次实验, 表明本系统能完成实时的红外目标识别. 识别速率为 25 f/s , 系统反应时间小于 1 s .

3 结语

本文提出一种用于红外警戒系统的复杂背景下红外小目标实时识别方法. 系统处理速度为 25 f/s , 系统反应时间不大于 1 s . 该系统具有以下特点:

(1) 在像素级上, 利用FPGA实现硬件二维空间数字滤波, 达到实时的视频处理速率;

(2) 采用块匹配法进行图像配准, 消除了运动平台的影响, 具有多目标识别能力;

(3) 目标运动算法分析及帧间分析进一步提高了目标识别的准确性, 降低了虚警率;

(4) 采用多微处理器并行处理结构及可重构的模块化结构, 保证系统具有较高的运算效率, 增强了系统的灵活性及其对算法的适应性.

REFERENCES

- [1] Otazo J J, Tung E W, Pareti R R. Digital filters for infrared target acquisition sensors. In: *Proc. SPIE*, 1980, **238**:78
- [2] David B Reiss. Spatial signal processing for infrared detection. In: *Proc. SPIE*, 1994, **2235**:38
- [3] Tekalp A M. *Digital Video Processing*. New York: Prentice-Hall, Inc., 1995, 95—106
- [4] John F Bronskill, John S A Hepburn. Detection and classification of target formation in infrared image sequences. Huber A J. *Imaging Infrared: Scene Simulation, Modeling and Real Image Tracking*. In: *Proc. SPIE*, 1989, **1110**:150
- [5] Charlene E C, Jerry S, Jonathan M M, et al. Signal processing algorithms for point target detection in consecutive frame staring imagery. *Proc. SPIE*, 1993, **2020**:93