

文章编号: 1672-8785(2008)12-0027-06

基于灰度形态学累加和 SUSAN 算法的 红外弱小运动目标检测

刘 刚^{1,2} 梁晓庚³

(1. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072 ;

2. 河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003 ;

3. 中国空空导弹研究院航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 本文提出了一种基于灰度形态学累加和 SUSAN 算法的红外弱小运动目标检测方法。首先利用 Butterworth 滤波器对原始红外图像进行高通滤波, 得到包含少许噪声点和目标点的处理图像; 然后, 通过基于灰度形态学的多帧累加的方式进一步提高图像的信噪比; 最后利用 SUSAN 检测算子对多帧累加过的红外图像进行分割并将真实目标检测出来。为了提高小目标检测的实时性, 给出了基于 FPGA+DSP 的硬件实现结构。实验表明, 该方法能够较好地消除背景和抑制噪声, 从而准确有效地检测红外运动弱小目标。

关键词: 红外; 弱小目标; Butterworth 高通滤波; 形态学; 多帧累加; SUSAN 检测
中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Dim Small Moving Infrared Target Detection Based on Gray Morphology Multiple Frame Accumulation and SUSAN Algorithm

LIU Gang^{1,2}, LIANG Xiao-geng³

(1. Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnique University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Electronics and Information, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 3. Key Laboratory of Aviation Science for Airborne Guided Weapon, China Airborne

Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In this paper, a method for detecting dim small moving infrared target based on gray morphological accumulation and SUSAN algorithm is proposed. First, a Butterworth high pass filter is used to process the original infrared image, thus an image containing some noise and target points is obtained. Then, the ratio of signal to noise of the image is further enhanced through the multi-frame accumulation in gray morphology. Finally, the SUSAN detection algorithm is used to process the image which is multi-frame accumulated and detect the true target. In order to improve the real time performance of small target detection, a hardware structure based on FPGA and DSP is given. The experimental result shows that this method can eliminate background and depress noise effectively and hence detect the moving small infrared target accurately and effectively.

收稿日期: 2008-09-03

基金项目: 中国一航集团航空科学基金重点实验室类资助项目 (20070112001)

作者简介: 刘刚 (1974 —), 男, 湖南临武人, 河南科技大学讲师, 西北工业大学博士研究生, 主要研究方向为图形图像处理、智能控制和软件工程。

Key words: infrared; dim small target; Butterworth high pass filter; morphology; multiple frame accumulating; SUSAN detect

1 引言

红外成像传感器由于具有工作隐蔽性好、抗电磁干扰、可有效地提高系统的全天候工作能力的优点而得到广泛应用。为了使系统有足够的反应时间,需要尽可能早地发现目标。然而,由于成像器件本身的噪声及背景杂波干扰往往很强,对小目标的检测就成了红外目标检测跟踪中的难点,同时也成了人们研究的热点之一。在低信噪比条件下,小目标边缘模糊,与背景的对比度差,颗粒噪声等局部干扰严重,因此小目标检测算法的关键是必须具有较强的抗干扰能力。在实际应用中,弱小目标的检测往往是跟踪系统的一部分,检测算法会直接影响后续的跟踪处理乃至整个系统的跟踪性能。所以检测算法必须做到稳定可靠,计算量小,便于实时实现。

本文提出了一种基于 Butterworth 高通滤波、形态学多帧序列图像累加与最小吸收同值核区 (SUSAN) 检测相结合的红外小目标检测方法。针对红外图像信噪比较低且目标位于高频域的特点,该方法首先利用 Butterworth 滤波器进行高通滤波,得到包含目标点和少许噪声点的处理图像;然后对相邻若干帧红外序列图像进行灰度意义上的累加,加大目标与背景间的灰度差,以提高红外图像的信噪比并进一步剔除噪声;最后利用 SUSAN 算子对信噪比提升的红外图像进行目标检测。在本文中,对各个处理阶段都进行了 MATLAB 仿真。原始红外图像序列的整个检测过程可通过以下四个步骤来实现:

- (1) Butterworth 高通滤波;
- (2) 灰度形态学膨胀放大目标;
- (3) 多帧累加平均提高信噪比;
- (4) SUSAN 算法检测目标。

为了提高算法的实现速度,结合当前最新的可编程逻辑器件的发展现状,给出了整套识别算法的硬件实现思路。下面从 Butterworth 高通滤波、相邻帧累加目标增强、SUSAN 检测和

硬件实现四个方面对红外运动弱小目标识别进行阐述。

2 红外序列图像的滤波

由于待检测的小目标信息大多集中在高频部分,而背景如海浪、云等部分相对稳定,处于图像的低频部分,故本文提出采用频域 Butterworth 高通滤波器提取给定红外序列图像中的高频信息部分,以实现高通滤波、达到初步提取目标和抑制背景噪声的目的。

Butterworth 高通滤波器是一个频域滤波器。一个阶为 n , 截止频率为 D_0 的 Butterworth 滤波器的传递函数为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u, v)]^{2n}} \quad (1)$$

式中, $D(u, v)$ 是频域空间点 (u, v) 到频域原点的距离。设红外图像为 $f(x, y)$, 其傅里叶变换为 $F(u, v)$, 则 Butterworth 高通滤波过程在频域上可以表示为

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) \quad (2)$$

将频域变换结果 $G(u, v)$ 经过傅里叶反变换 T^{-1} :

$$g(x, y) = T^{-1}[G(u, v)] \quad (3)$$

式中, $g(x, y)$ 即为经过高通滤波的红外图像。一般情况下,高通滤波器的截止频率选择在使 $H(u, v)$ 下降到其最大值的 $1/\sqrt{2}$ 处, Butterworth 滤波器的传递函数可以修改为下式:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + 0.414[D_0/D(u, v)]^{2n}} \quad (4)$$

Butterworth 高通滤波器的截止频率可以通过对典型红外图像的频谱做预先的分析得到并被制作成表。在实际的红外图像序列处理过程中,人们是通过实时分析图像特点和选择相应滤波截止频率,进行自适应背景抑制和初步目标提取的^[1]。阶数 n 用于控制 $H(u, v)$ 从原点开始的增长率。本设计中的滤波器的阶数为 2 阶。实验取弱小目标 (如飞机) 红外图像序列中的相邻 3 帧。原图像及处理效果如图 1 和 2 所示。由图 2 可以看出,原图像中变化缓慢的背景云得

到了较好的抑制。

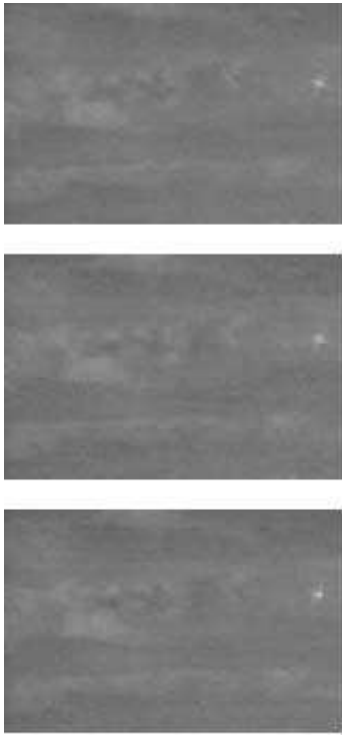


图 1 原红外序列图像 (相邻三帧)

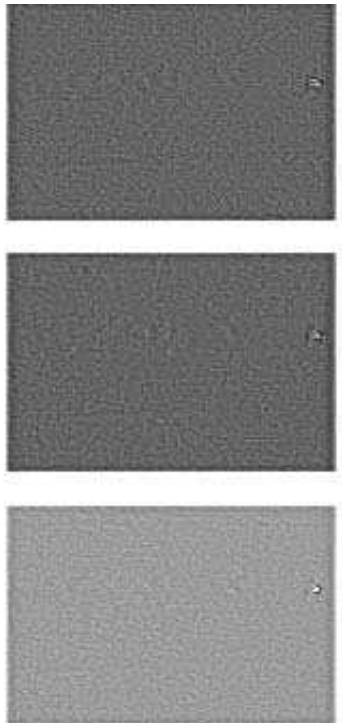


图 2 经过 butterworth 高通滤波的图像 (截止频率为 $D_0 = 44\text{Hz}$)

3 红外序列图像的增强

Butterworth 高通滤波抑制了变化缓慢的背景, 得到了包括要检测的小目标和一些高频噪声点的处理图像。由于待检测的小目标处于图像中较亮的区域, 为了突出待检测的目标, 可以利用灰度意义上的相关帧膨胀累加来完成红外序列图像的增强^[2]。这里的膨胀是形态学意义上的膨胀, 它的目的是确保相邻帧的同一目标点的能量能够得到有效的累加。形态学膨胀可以由下式表达:

$$f_d(x, y) = (f \oplus g)(x, y) \\ = \max_{(m, n) \in D(g)} [f(x - m, y - n) + g(m, n)] \quad (5)$$

式中, g 是结构元素, $D(g)$ 是结构元素的定义域, f 是待处理的图像。结构元素的大小可根据目标在帧间的位移或抖动来确定。图 3 是图 2 经过形态学膨胀后的效果图。

结构元素的形状和大小应根据目标的大小来选择。由于红外小目标在图像中常呈现出圆点状, 因而这里的膨胀结构元素取大小为 4×4 的方形元素。从膨胀效果图 (图 3) 中可以看到, 点目标得到了进一步增强, 但同时一些噪声点也被放大了。

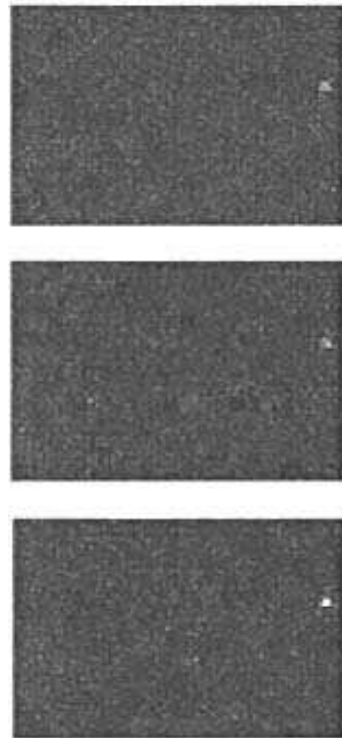


图 3 形态学膨胀效果图

对经过形态学膨胀的相邻帧进行灰度意义上的累加可加大目标与背景的对比度, 该思想可表达为

$$\overline{f(x, y, t)} = \frac{1}{m} \sum_{t=k}^{k+m-1} f_d(x, y, t) \quad (6)$$

式中, t 表示帧号, 该式将相邻 m 帧累加, 积累的帧数将根据系统抖动、目标运动速度以及结构元素尺寸进行选取。当系统抖动较大、目标运动较快以及结构元素尺寸较小时, 积累的帧数不宜过大。经过累计后, 在保证目标点和噪声点均值不变的基础上, 信噪比被提高到原来的 $\sqrt{m}$ 倍^[3]。数字视频的采集频率为 25 帧/s, 目标在相邻帧的移动距离为几个像素左右。仿真中积累的帧数 m 值取 3, 得到了不错的效果。形态学累加增强后的图像如图 4 所示。

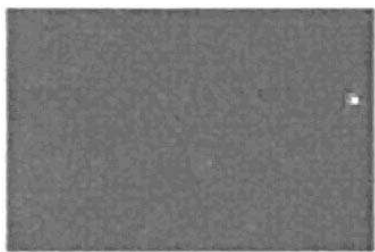


图 4 经过形态学累加后的效果图

由图 4 可以看出, 经过累加平均, 目标与背景的对比度得到了增强, 抑制了膨胀图像的噪声, 进一步突出了待检测的小目标。

经过 Butterworth 高通滤波和基于灰度形态学的序列图像增强后, 就进入了红外小目标识别阶段, 然后利用 SUSAN 算子进行小目标检测。

4 SUSAN 检测

SUSAN 算子是一种基于灰度的特征获取方法, 它能够较好地检测边缘点和角点。角点是图像的一种重要局部特征, 在这里, 定义图像中出现局部曲率极大值的轮廓点以及两个以上边界的交点为角点。

SUSAN 算子是以核同值区 (USAN) 面积作为特征来进行检测的。在该方法中, 首先要确定一个圆形或方形的小模板区域, 且模板的中心称

为核, 然后使该模板在待检测的图像中移动。将图像包含的模板区域中各个像素的灰度与核像素的灰度进行比较, 就会发现总有一部分模板区域内像素的灰度值与核像素的灰度值相同或近似, 该区域称作 USAN 区域, 该区域所包括的像素个数称为 USAN 值。USAN 值较大, 表明核像素处在图像中灰度较一致的区域; 在模板核接近边缘时, USAN 值减小; 当其到达角点时, USAN 值最小。因此, 利用 USAN 值的大小变化就可以检测到边缘和角点。由于 USAN 区域的计算是对核子邻域中相似灰度像素的累加, 这实际上是一个积分的过程, 对于局部噪声不敏感, 而且 SUSAN 检测避免了梯度计算, 因而它实现简单, 计算量小, 特征定位准确, 计算速度比常规的特征提取方法快, 适用于实时图像处理^[4]。

设模板为 N , 将其依次放到图像中每个点的位置。在每个位置上, 将图像模板区域内的每个点的灰度与核像素灰度进行如下比较:

$$U(x_0, y_0; x, y) \begin{cases} 1 & |f(x_0, y_0) - f(x, y)| \leq T \\ 0 & |f(x_0, y_0) - f(x, y)| > T \end{cases} \quad (7)$$

式中, (x_0, y_0) 是核在图像中的位置坐标, (x, y) 是模板 N 中其他位置在图像中的坐标, $f(x_0, y_0)$ 和 $f(x, y)$ 分别是像素在 (x_0, y_0) 、 (x, y) 处的灰度, T 是一个灰度差阈值, 该值的大小对于处理结果中的噪声抑制有较大影响, 一般说来, 该值越大, 抑制作用越明显, 但同时也会造成部分待检测目标信息的丢失, 应结合处理对象权衡考虑。在可见光图像中, 目标与背景主要靠其边缘区分, T 的取值要小, 一般在 6 ~ 16 间选择, 而红外图像的 T 可取大些^[5]。在本红外序列图像处理中, T 值在 30 ~ 40 之间。模板中的每个像素都要经过相应的运算, 由此可以得到 USAN 区域的面积:

$$A(x_0, y_0) = \sum_{(x, y) \in N} U(x_0, y_0; x, y) \quad (8)$$

实际应用 SUSAN 算子时, 需要将 USAN 面积 A 与一个固定的几何阈值 G 进行比较, 该阈值可以设置为 $3A_{max}/4$, 其中 A_{max} 是 A 所能取得的最大值, 它是模板区域所包含的全部像素点个数。几何阈值越大, 提取的目标点信息就越

多, 同时也会保留相对于目标而言的噪声点。比较过程可以通过下式描述:

$$E(x_0, y_0) = \begin{cases} G - A(x_0, y_0); & \text{当 } A(x_0, y_0) < G \\ 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

计算结果中不为零的 E 值对应的位置就是待检测的目标点。SUSAN 检测算法可以描述如下:

(1) 图像像素定位;

(2) 以当前像素点为核心计算 USAN 面积 A : 将当前核心点确定的模板区域对应于图像内每一个像素点的灰度值与核心点灰度值做比较, 如果差别在给定的阈值 T 范围内, 则 USAN 面积计数器 A 加 1;

(3) 根据 USAN 面积值 A , 判断当前点是否为目标: 将当前点的 USAN 面积值 A 与给定的几何阈值 G 做比较, 如果小于 G 值, 则认为当前点是目标边缘点并将其记录下来;

(4) 判断整帧图像是否扫描完毕, 如果否, 回到第 1 步, 反之结束。

结合红外小目标的形状和大小特点, 模板取 4×4 大小的方形区域, 即 $A_{max} = 16$ 。利用 SUSAN 算法对图 4 进行处理, 检测到的目标边缘点用灰度值 255 来表达, 处理结果见图 5。



图 5 SUSAN 检测的效果图

由图 5 可以看出, 经过上面一系列处理过程, 较好地检测出了小目标。

这里需要说明的是, 如果高频噪声点与红外小目标在灰度意义上差别不大, 经过上面一系列检测过程后仍然会得到保留。由于目标会在当前检测位置周围邻域内连续的若干帧中出现, 而噪声点的位置相对随机, 一般只会出现在序列图像中有限的几帧内, 因此可以利用该性质进一步剔除较强的高频噪声点^[6]。

5 硬件实现思路

红外图像目标检测系统具有处理数据量大、算法复杂和系统实时性要求强等特点。大多数软件算法往往受限于硬件器件, 使得图像处理实时性差, 因此有必要设计一种可实现上述算法的硬件高速数字信号处理系统。其中低层信号处理算法处理的数据量大, 速度要求高, 但运算结构相对简单, 可用现场可编程门阵列 (FPGA) 来实现; 高层处理算法所处理的数据量较低层算法少, 但算法的控制结构复杂, 适合用运算速度快、寻址方式灵活、通信机制强大的数字信号处理器 (DSP) 芯片来实现。采用 FPGA+DSP 的系统进行图像处理, 能同时兼顾图像处理过程中的实时性和灵活性。

在整个硬件系统中, FPGA 用于完成图像采集、图像预处理、配置输入输出缓存等工作。这里的预处理主要指 Butterworth 滤波。采用两个 DSP 实现图像处理的并行性, 其中 DSP1 实现红外图像的形态学序列累加增强, DSP2 实现基于 SUSAN 算法的红外小目标检测。整个硬件系统可以基于流水线结构以提高数据处理的吞吐率。

本文给出的算法大都具有多个数据接受同一处理 (比如说乘法或加法) 的特性, 该特性在并行处理领域被称为单指令流多数据 (SIMD)。DSP 中具有多个重复的功能单元, 因而可在硬件上保证处理算法中 SIMD 特性的实现。在 DSP 程序的设计中, 充分发掘任务的 SIMD 特性可以进一步提高处理算法的速度。

6 结语

本文针对红外弱小运动目标检测的实际问题, 结合实际图像的基本特点, 提出了基于 Butterworth 高通滤波、多帧累加增强、SUSAN 目标检测的识别算法。其中, Butterworth 高通滤波器的截止频率、形态学膨胀结构元素的类型与大小、膨胀累加的图像帧数、SUSAN 检测中灰度阈值和几何阈值等因素, 是整套检测算法各个阶段需要考虑的关键点, 它们的确定必须根据红外图像背景的特点、待识别目标的实际大

小及运动速度来综合考虑。对算法各个阶段进行的 MATLAB 仿真的结果表明, 该实现思路可以较好地检测出弱小运动目标。此外, 为了提高红外弱小运动目标识别算法的实时性和实用价值, 本文给出了基于 FPGA+DSP 的硬件实现思路, 但如何结合各个处理阶段的并行性特点来实现还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测 [J]. 红外与毫米

波学报, 2006, 25(1): 41-45.

- [2] 王彤超, 吴琼玉, 蔡宣平. 一种复杂背景下运动小目标的检测方法 [J]. 红外, 2006, 27(4): 15-19.
[3] 李正周, 董能力, 金钢. 复杂背景下红外运动点目标检测算法研究 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(5): 410-414.
[4] 张坤华, 王敬儒, 张启衡. 多特征复合的角点提取方法 [J]. 中国图像图形学报, 2002, 7(4): 319-324.
[5] 袁慧晶, 王涌天. 一种抗干扰的弱小目标检测方法 [J]. 光子学报, 2004, 33(5): 609-612.
[6] 彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测 [J]. 电子学报, 1999, 27(12): 47-51.

国外专利介绍

根据红外吸收特性检测气体浓度的方法和仪器

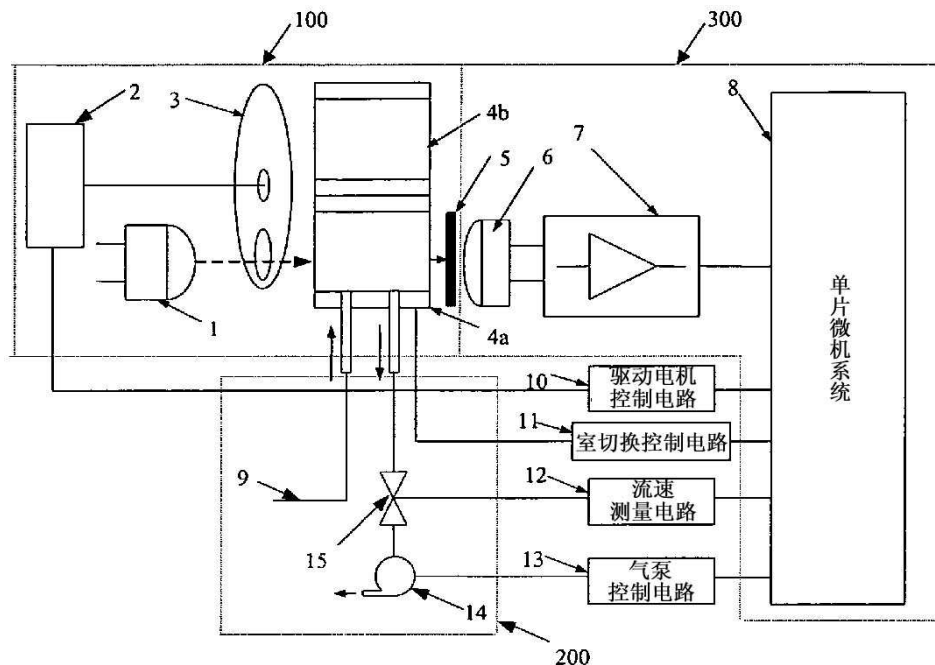
美国专利 US7351954

(2008 年 4 月 1 日授权)

本发明提供一种可根据红外吸收特性检测气体浓度的方法和仪器, 该仪器的一个特点是具有自动定标功能, 这种自动定标功能是这样实现的: 在仪器内加一个充满已知浓度的 CO_2 气体的参考室; 实时或定期将参考室切换到探测光路中, 以获取参考室内 CO_2 气体浓

度的实测值; 然后, 通过将该实测值与已知的 CO_2 气体浓度标准值进行比较, 便可获得定标因子; 一旦完成定标过程, 就将检测室切换到探测光路中, 这样便可以准确地检测出一种气体的浓度了。在该仪器中, 定标过程和检测过程使用的是同一个探测光路 (红外光源、滤光片等)、同一个红外光信号处理器 (红外传感器、放大电路、单片微机等)。因此, 先前技术中由于不同光路之间电路元件温度漂移特性不同造成的负面效应可以被消除, 而且检测结果的误差可以大大减小。该仪器的特点是, 结构简单, 生产成本低, 而且无需人工维护。

本专利说明书共 10 页, 其中有 1 张插图。



高 编译