

复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述

汪国有, 陈振学, 李乔亮

(华中科技大学, 图像识别与人工智能研究所, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 复杂背景下低信噪比弱小目标的自动检测是当今目标自动探测研究尚未解决的一个难题。目前, 国内外许多学者已经作过大量的检测算法研究, 但还没有建立成熟的理论体系和切实可行的实用算法, 尤其是在复杂背景干扰的抑制方面, 大部分研究工作所处理的还不是真正的复杂背景。本文在分析和总结国内外现有算法研究的基础上, 指出了复杂背景下红外弱小目标检测的发展趋势, 并提出了检测跟踪的一些有效技术措施。

关键词: 复杂背景; 弱小目标; 信噪比; 背景预测

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2006)05-287-06

A Review of Infrared Weak and Small Targets Detection under Complicated Background

WANG Gou-you, CHEN Zhen-xue, LI Qiao-liang

(Institute of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, State education Commission Laboratory for Image Processing & Intelligence Control, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430074, China)

Abstract: It is an unfathomed and difficult problem that weak and small targets are detected in complicated background and low SNR. Scholars at home and abroad offer many detection algorithms, but these algorithms aren't mature, especially to complicated background, and these algorithms almost deal with uncomplicated background. This paper summarizes existing algorithms of weak targets detection under complicated background, points out weak targets detection development direction and refers to many efficient technique measures.

Keywords: complicated background; weak and small targets; SNR; background forecast

引言

在现代化的高技术战争中, 武器系统应具备极快的反应速度和良好的隐身性能, 远距离的红外目标探测技术能很好地满足这一条件, 它能及时地发现、跟踪目标, 实现迅速有效的攻击, 是机载武器系统发展的一个趋势^[1~3]。对于远距离目标, 在视场中是以小目标形态出现的, 目标与背景的对比度较低, 要保证可靠、稳定、准确地检测并跟踪目标是很困难的。因此, 远距离时低对比度红外弱小目标的检测技术是武器系统成败的关键, 对于提高新一代精导武器的作战

距离及反应速度具有十分重要的意义。

从概念上讲, 复杂背景是针对简单背景而言的。所谓简单背景是指背景图像灰度的空间分布是平稳的, 灰度的统计均值和方差具有空移不变性, 如海面、天空和沙漠等单一物理成分构成的区域图像; 而复杂背景是指背景图像灰度的空间分布是不平稳的, 灰度的统计均值和方差不具有空移不变性, 如天海交接处、飞机场和港口等多种物理成分构成的复合图像。小目标是指仅含少量像素的目标, 其面积较小, 不能反映目标的几何轮廓特征, 缺乏有效的形状特征, 可利用的有效信息一般有目标灰度的平稳性和目标运动轨迹的连续性。与背景类似, 弱小目标是相对强小目标而言的, 强小目标是指与背景灰度差异显著地高于背景方差的小目标; 对应地, 弱小目标是指与背景灰度差异不高于背景方差的小目标, 因此, 复杂背景下弱小目标检测技术研究就是在背景图像灰度是空间非平稳分布的、目标背景灰度差异小于背景方差情况下, 研究和开发小目标检测涉及的目标增强变换、

收稿日期: 2005-10-18

作者简介: 汪国有(1965), 男, 安徽省休宁县人, 教授, 博导, 主要从事图像建模、匹配制导、计算机视觉以及目标检测等方面的教学和研究工作。在国内外学术刊物上发表论文 80 余篇, 获国家教委科技进步一、二等奖多次。

背景抑制变换、变换特征建模、变换特征判别函数、变换特征门限估计、变换特征辨识以及算法性能评估等一系列的理论、方法和算法。

在复杂背景且信噪比较低的情况下,图像序列中运动弱小目标的检测一直是图像处理领域中比较困难的问题。当待检测目标处于远距离时,它们在像面上仅占几个像素,无形状与结构特征,且强度较弱,并处于复杂背景下,被看作是复杂环境下的弱点目标。弱小目标处于复杂背景中时,由于目标和背景的双重复杂性,使得目标检测的难度大为增加。

因此,对复杂背景下红外弱小目标的检测技术的研究,对于提高现代化高技术武器的作战距离及反应速度具有重要意义。本文系统的分析了有关的文献,对近年来国内外该领域的研究成果进行了综述,并从检测概率和虚警概率入手,分析了提高检测性能的条件。

1 目标背景特性研究的现状

国内外学者对于红外小目标检测的问题已做了很多富有成效的工作,尤其是90年代以来,小目标检测技术更是取得了长足的发展。然而,实时鲁棒的小目标自动检测技术尚未完全突破,至今也没有一种特别有效的方法。并且,许多文献在作算法讨论时往往回避低信噪比下的小目标检测问题,另外大部分文献针对的背景特性是慢变化,甚至是平稳的背景;目标是慢运动、灰度慢变化,并有一定的形状和面积。对于具有以上目标特性的目标检测算法,如动态规划法^[4]、序贯假设检验法^[5,6]、最优投影法^[7]和Falconer博士采用的Hough变换法,还有神经网络、分形^[8]、形态学滤波等,都有一定的作用,只是在计算量和计算复杂度方面,仍有待提高。背景的预处理一般是利用一些滤波器,如中值滤波器^[9,10]、高通滤波器^[11]和匹配滤波器^[12,13]以及它们的一些组合改进形式^[14],但当背景是复杂背景时,中值滤波器就失去了它的作用,而高通滤波器对于变化缓慢的背景滤除作用明显,对于快变化的背景也是无能为力。匹配滤波器的适用范围较窄,当目标弱到一定程度时,使用它也没有什么好的效果。

目标检测算法按照背景预测和目标增强两个方面的思路进行分类。背景预测的本质是充分利用背景本身所固有的、规律性的变化特性,使变换后的背景特性具有某种相对的稳定性,改进背景预测的精度和与目标特性的分离性;而目标检测的本质是充分利用目标本身所固有的、规律性的多种特性,使变换后的目标特性得到有效的增强,改进目标特性的显著性和

与背景的分离性。总的来说,复杂背景下弱小目标检测的研究应包括:

1) 具有分离特性的目标与背景特性选择和计算算法

目标检测算法研究的目的是提高目标与背景特性的可分性。目标与背景特性的可分性定义为使得区分目标与背景的错误率 $P(e)$ 达到最小,也就是使正确分类识别概率 c 最大。

目标检测问题,可以看作是两类模式的分类问题。根据模式识别理论,当采用某种准则把待识别模式判属某类时,判错的可能性是存在的,就是说在用统计准则判决某一具体的模式 x 的类别时,判决结果可能是错误的,把实属 w_j 类的模式判为属于 w_i 类。

统计判决的基本方法是根据类的概率和概率密度将模式的特征空间划分成两个子区域 W_1 和 W_2 ,即:

$$W_1 \cup W_2 = W, W_1 \cap W_2 = F \quad (1)$$

式中: F 是空集。当 $x \in W_1$ 时,判 $x \in w_1$ 类;当 $x \in W_2$ 时,判 $x \in w_2$ 类。这时可能会发生两种错误,一种是把实属 w_1 类的模式判属 w_2 类,发生这类错误的原因是属于 w_1 类的模式在特征空间中散布到 W_2 中去,从而将其判为属于 w_2 类,这时的误判概率为:

$$e_{12} = \int_{\Omega_2} p(x/w_1) dx \quad (2)$$

类似地,另一种错误是把实属 w_2 类的模式判属 w_1 类,此时的误判概率为:

$$e_{21} = \int_{\Omega_1} p(x/w_2) dx \quad (3)$$

设 w_1 和 w_2 类出现的概率分别为 $P(w_1)$ 和 $P(w_2)$,则总的误判概率 $P(e)$ 是:

$$\begin{aligned} P(e) &= P(w_1)e_{12} + P(w_2)e_{21} \\ &= P(w_1) \int_{\Omega_2} p(x/w_1) dx + P(w_2) \int_{\Omega_1} p(x/w_2) dx \end{aligned} \quad (4)$$

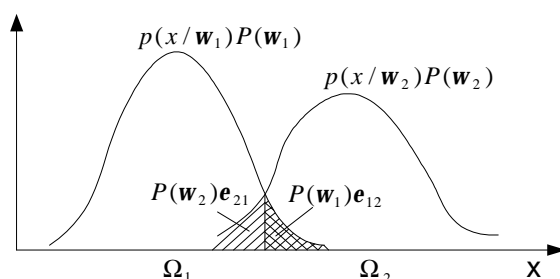


图1 一维模式的误判概率计算示意图
Fig.1 Misjudgment probability of one dimension model

对于目标检测,希望在总体上、统计上误判最少,因此所取的判决准则是使误判概率最小,这等价于使正确分类识别概率 $P(c)$ 最大,即:

$$P(c) = \int_{\Omega_1} P(w_1)p(x/w_1)dx + \int_{\Omega_2} P(w_2)p(x/w_2)dx \rightarrow \max \quad (5)$$

这就是最小错误概率准则。

在目标识别中, 假设两个类的某个特征 T 的概率密度函数如图 2 所示, 且第一类和第二类的特征均值分别为 m_1 和 m_2 , 方差分别为 s_1 和 s_2 。

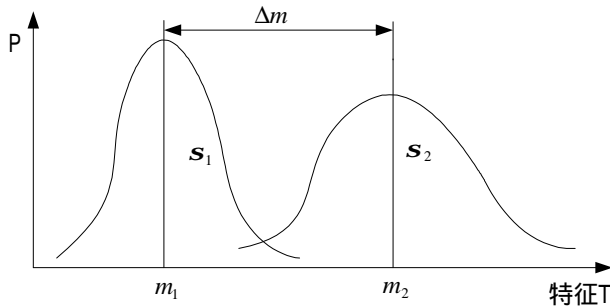


图2 两类模式的特征 T 概率密度分布图
Fig.2 Probability density distribution

显然, 当 Δm 越大, s_1 和 s_2 越小, 错误概率 $P(e)$ 就越小, 同时正确分类识别概率 $P(c)$ 越大。

2) 多目标特性的目标显著性与分离性融合增强算法

对于给定的目标与背景特性, 其概率分布函数重叠区域的面积定义为 Pe , 目标与背景的可分性定义为 $1 - Pe$ 。由于目标与背景灰度的概率分布函数是变化的, 因此, 如何利用变化的目标与背景灰度特征去计算具有稳定可分离性的特征, 并估计其概率分布函数是复杂背景下弱小目标检测算法研究的重点。

假设待识别模式 w 提取的实时特征集合为 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 而每一个特征 t_i 都对应着一个错误分类概率 $Pe(t_i)$ 。多特征融合的总置信度 Pd 与 $Pe(t_i)$ 成反比关系, 每增加一个特征, 识别的置信度就应该得到增强, 即 $Pd\{t_1, t_2, \dots, t_i\} > Pd\{t_1, t_2, \dots, t_{i-1}\}$, 因此多特征融合置信度可以采用这样的计算公式:

$$\begin{aligned} Pd\{t_1, t_2, \dots, t_i\} &= 1 - (1 - Pd(t_1)) (1 - Pd(t_2)) \cdots (1 - Pd(t_i)) \\ &= 1 - Pe(t_1)Pe(t_2) \cdots Pe(t_i) \end{aligned} \quad (6)$$

寻找能够最大程度的区分目标与背景的特征, 也是需要研究的课题。

1.1 慢运动目标的几何动力学特征

弱小目标之所以难以检测, 就是由于弱小目标本身没有几何形状或纹理特征, 可利用的有效特征信息较少, 只能利用它的灰度分布连续和运动连续等目标特性。为了对运动目标进行有效地检测, 必须利用多帧图像的运动信息, 将目标的运动特征和运动轨迹的连续性、一致性结合起来考虑。光流法是解决此类问题的有效方法。文献[15]给出了光流运动约束方程, 以后所有光流法的研究都是基于这一约束方程; 文献[16]指出光流计算存在病态解问题, 必须引入附加条

件才能确定光流的唯一解; 文献[17~19]提出了几种应用光流法检测运动目标的方法; 文献[20]提出了两种计算光流场的新方法, 并和其他光流场计算方法进行了比较。光流法的理论和算法存在以下几方面的问题: 约束方程只有在梯度很大的点上才严格成立[21]; 计算的不稳定性; 运算量大, 难以实时实现等, 上述问题限制了光流法的理论和算法的应用。

1.2 慢运动目标的灰度动力学特征

弱小目标另外一个可利用的特性就是帧间灰度的连续性, 因此, 采用多帧图像的累加, 可以增强目标的能量, 使目标更加突出。其意义就在于提高了目标的信噪比, 使得目标与背景的可分性增强, 由于能量积累区域选取存在较大的困难, 对快速机动的目标不太适用。该方法只适用于运动缓慢的目标。积累帧数增加可以使像素值的方差减小而均值不变, 这说明平均的结果使得信噪比提高了[22]。文献[23]为解决低信噪比条件下抖动红外弱小目标的检测问题, 提出了一种膨胀累加的检测算法, 该算法运用膨胀累加方法能够消除抖动对多帧累加算法的不利影响, 使目标能量能够实现有效的积累。尽管如此, 在实际应用中积累的帧数还要根据系统抖动、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。

1.3 利用目标本身固有的规律性特征

图像中弱小目标的检测, 从图像分析的观点看是判断图像中的孤立奇异点。红外背景往往呈大面积的连续分布状态, 在红外辐射的强度上也呈渐变过渡状态, 从而使得它们的红外图像在图像灰度空间分布上具有较大的相关性, 是一种缓慢变化且非平稳的二维随机过程。目标的红外辐射强度与其周围自然背景的辐射强度无关, 且一般都高于背景的辐射强度, 可以认为背景处在图像信号的低频部分, 而目标处在图像信号的高频部分, 通过小波变换将红外图像的低频部分和低频部分进行分离, 然后对各高频分量进行分析, 可以将目标检测出来。文献[24,25]采用小波变换实现增强图像、抑制噪声, 然后检测目标; 文献[26,27]通过对图像信号作多尺度的小波变换, 检测弱小目标和提取不同分辨率下背景纹理的能量特征; 文献[28]通过一种鲁棒的小波多尺度图像配准过程消除主场或背景运动的影响; 文献[29]采用小波滤波器对每帧图像滤波, 提高目标的信噪比, 剔除部分噪声点, 降低了算法的运算量; 文献[30]提出一种针对低可观测时变目标的小波算法; 文献[31]指出, 在经过小波变换滤波后, 可以利用不同分解尺度上的评估信息将目标从背景中分离出来; 文献[32]定义了一种新的小波

变换即方向小波变换,并研究了它在运动弱小目标检测中的应用,提出了一种多尺度的运动弱小目标检测方法;文献[33]针对目标轨迹产生随机偏移情况下运动弱小目标的检测问题,提出了又一种基于方向小波变换的多尺度弱小目标检测方法,能够稳定、有效的检测各种做匀速直线运动的弱小目标。不过,在运用小波变换进行弱小目标检测时,存在以下问题:若选用简单的小波基,其结果与高通滤波器的效果非常相似,若选用复杂的小波基,则运算过于复杂。

1.4 利用背景本身固有的规律性特征

在进行弱小目标检测的时候,目标在图像中所占的尺寸是非常小的,而绝大部分是背景,这就需要充分利用背景本身固有的规律性特性,也是背景预测的出发点。在弱小目标的检测、识别中,图像的背景在一个小区域内不会有很大的起伏,而目标总是在它所在的小区域里具有较突出的变化,因此,就有这样的说法:图像中的任何一点如果是背景中的点,它的灰度、梯度和其它特征都可以根据它周围的点来预测;如果预测失败则可认为这一点可能是目标点^[45~47]。目前背景预测用于复杂背景中弱小目标检测的观念已被大多数学者所接受,Philip等人将随机模型背景预测算法应用于红外图像和合成孔径雷达(SAR)图像的目标检测;Denney等人提出了自适应递归的背景预测用于点目标检测。

1) 基于形态学滤波的背景预测

利用形态学中腐蚀与膨胀操作的对称性可以很好地估计出背景,进行图像背景的预测,进而求出原图与背景估计图之差,从而有效地在图像中消除背景及噪声点对点目标检测的影响。近年来,国内外学者利用数学形态学理论对弱小目标的检测问题进行了研究,并取得了一些成果^[34~41]。膨胀运算使得在比结构元素小的区域中的黑色细节将被减少或去除,腐蚀运算使得在比结构元素小的区域中的明亮细节经腐蚀后将被减少或去除。基于形态学滤波的背景预测的方法有很多,比较典型的有Raphael Horak在[39]中介绍的Top-Hat变换法,它主要使用上部平坦的柱体或平行六面体作为结构元素,还有Steve Hay在[42]中介绍的形态学方法。

2) 基于卡尔曼滤波的背景预测

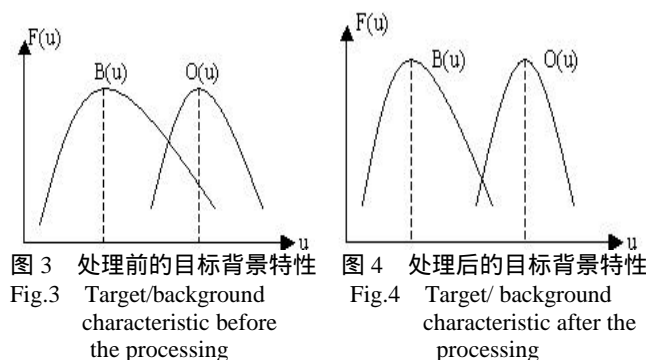
基于卡尔曼滤波理论的时间递归方法来预测背景的方法是基于这样的事实:背景在帧间的变化较目标在帧间的变化要缓慢一些,可以采取学习的方法来预测背景^[43,44]。当背景在帧间的变化较快时,卡尔曼滤波预测算法就遇到了困难。

3) 基于管道滤波的背景预测

管道滤波实际上是一个时空滤波器,它是在序列图像的空间位置上以目标为中心建立的一个空间管道,管道的直径(如果管道是圆形的)代表空间的作用尺寸,管道的长度代表检测时间的长度。管道滤波是一种较为经典的时空滤波器,许多文献给出了管道滤波的基本思想和算法流程^[48~52]。采用时间域和空间域的管道滤波的方法时,要预先知道目标的运动速度,以便设置合理的管径。如果目标运动过快,管道滤波器的管径就需要选的粗一些,这样对算法的复杂度就会提高很多。

2 目标背景特性研究的发展趋势

对于非平稳、快变化的复杂背景中运动较快、灰度快变化、没有形状和面积的弱小目标,国内外学者研究的较少,实际上检测弱小目标的主要困难是其特征不明显、与背景不可分、存在灰度级交叉重叠,而复杂背景的空间统计特性是突变的、非均匀的、存在灰度奇变(如图3)。因此,提高目标检测算法性能的方法是寻求一种变换,使同一类模式靠的更近一些,而不同类模式离得远一些,以便把它聚合到一起,在这种思想的指导下,可以将变化的目标背景变为平稳的目标背景,使得目标与背景的均值差距变大,背景的方差变小,背景变得均匀、去掉奇变点(如图4),并在一定的概率模型下去分析和估计差异度量检测门限。这里所谓离得远,不一定是均值相差较远。在这种情况下,不能用点与点之间的距离,也不是点与一组点之间的距离,而是两个分布的距离,这是一个统计距离。如果两类模式在统计意义上离得远,就容易识别。



从图3、图4可以看出,经过变换处理过得目标背景特性具有更强的可分离性。

另外,寻求一种合适的特征变换,以利用更有效地特征,也是需要研究的课题。如图5所示,目标和背景在特征坐标 T_1 和 T_2 下,两类模式都很难分离。可以设想特征坐标轴做一变换,如图6所示,此时,

虽然利用特征 T_1 还是很难分离两类模式, 但是, 利用特征 T_2 却可以达到很好的分离效果。

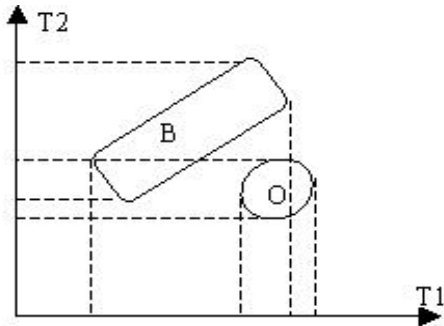


图5 两类模式特征提取之一

Fig.5 First kind of model characteristic exaction

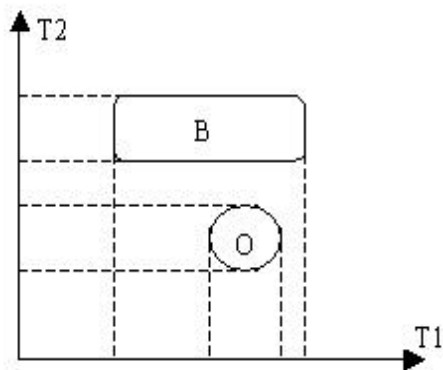


图6 两类模式的特征提取之二

Fig.6 Second kind of model characteristic exaction

这样进行目标检测识别时, 得到的检测概率就会增大, 而误判概率就会减小。

3 总结

针对复杂背景和弱小目标的双重复杂性, 国内外的学者们提出了不同的检测算法。总的说来, 利用目标和背景固有的特性, 充分地抑制背景和增强目标是提高目标检测性能的关键。对于由多个平稳区域构成的复杂背景, 可采用多阈值法将要处理的图像分成多灰度层次区域, 把处理非平稳的复杂背景转化为处理多个平稳的简单背景, 有助于弱小目标的检测。然而, 在实际应用中, 目标和背景的复杂性远远超出了人们的想象, 如何最大限度的利用目标背景特性来有效的增强目标、抑制背景仍然是当前研究的重要课题。

参考文献:

- [1] Glen S W, Edward J R, Kun Mu Chen. Enhanced detection of a target in a sea clutter environment using astepped Ultra-Wideband Signal and EPulse Cancellation[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. 2001, **49**(8): 1166~1173.
- [2] Philip B , Chapple D C , Bertilone R S C. Stochastic model-based processing for detection of small targets in non-gaussian natural imagery[J]. *IEEE Tans. on Image Processing*. 2001, **10**(4): 554~564.
- [3] Zhang Xiaoping, Mita D D. Segmentation of bright targets using wavelets and adaptive thresholding[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*. 2001, **10**(7): 1020~1030.
- [4] Barniv Y. Dynamic Programming Solution for Detecting Dim Moving Targets[J]. *IEEE Trans On AES*. 1985, **21**(1).
- [5] Blostein S. D. and Huang T. S. Detection of Small Moving Objects in Image Sequences Using Multistage Hypothesis Testing[A]. *IEEE Int. Conf. On ASSP[C]*. 1988.
- [6] Blostein S. D. and Huang T. S. Detecting Small Moving Objects in Image Sequences Using Sequential Hypothesis Testing[J]. *IEEE Trans. On Signal Processing*. 1991, **39**(7).
- [7] P.L. Chu. Projection for Multidimensional Signal Detection[J]. *IEEE Trans ASSP*. 1988, **36**(5).
- [8] Xue Donghui, Zhu Yaoting. et al.. Small Target Detection Based on Generalized Multiscale Fractal Parameter[J]. *Journal of China Institute of Communications*. 1997, **18**(6): 70~75.
- [9] Yang Weiping, Shen Zhenkang. Small target de- tecton and preprocessing technology in infrared image sequences[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 1998, **27**(1): 23~28.
- [10] Barnett J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds[A]. *SPIE[C]*. 1989, **1050**: 10~18.
- [11] Xu Ying. Small Moving Target Detection in Infrared Image Sequences[J]. *Infrared Technology*. 2002, **24**(6): 27~30.
- [12] Muller M. Saliency Measures in Cluttered IR Images for ATR[A]. *SPIE[C]*. 1999, **3699**: 150~154.
- [13] Scharfand L L, Friedlander B. Matched subspace detectors[J]. *IEEE Trans. On Sig. Proceeding*. 1994, **42**(8): 2146~2156.
- [14] Deshpande S D, Er M H, Ronda V. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[A]. *SPIE[C]*. 1999, **3809**: 74~83.
- [15] Horn B K, Schunck B G. The image flow cons- traint equation[J]. *CVGIP*. 1986, **35**(3): 26~31.
- [16] Horn B K, Schunck B G. Determining optical flow [R]. MIT: AIMemo AI Lab MIT. 1986: 88~93.
- [17] Uras S, Giroso F, Verri A. A computational approach to motion perception[J]. *Biol Cybern*. 1988, **60**: 79~87.
- [18] Reichardt W E, Schlogl R W. A two dimensional field theory for motion computation[J]. *Biol Cybern*. 1988, **60**: 23~25.
- [19] Markandey V. Motion estimation for moving target detection[J]. *IEEE Trans on AES*. 1996, **32**(3): 866~874.
- [20] Shan Fu. Pridmore, T. Image flow field detection[J]. *Signal Processing*. 1996, **2**(3): 1090~1093.
- [21] Bimbo A D, Nesi P, Jorge L C Sanz. Optical flow computation using extended constraints[J]. *IEEE Trans Image Processing*. 1996, **5**(5): 720~739.

- [22] Xu Jun, Zhou Xiang, Liang Changhong. Algorithm of small target detection in IR image sequences[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2003, **32**(4): 390~393.
- [23] Xiong Hui, Shen Zhenkang. Dithering Infrared Low SNR Target Detection Algorithm[J]. *Journal of National University of Defense Technology*. 1998, **20**(2): 54~59.
- [24] Li Guokuan, Peng Jiaxiong, Li Hong. Small target detection based on multi-wavelet transform[J]. *Huazhong University of Science & Technology*. 2000, **28**(1): 72~75.
- [25] Zuo Zhen, Zhang Tianxu. Algorithm based on wavelet transform for small target detection on sea surface in infrared image[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 1998, **27**(3): 42~45.
- [26] Li Guokuan, Peng Jiaxiong, Li Hong. Infrared imaging dim target detection based on wavelet transform[J]. *Huazhong University of Science & Technology*. 2000, **28**(5): 69~71.
- [27] Sheng Wen, Deng bin, Liu Jian. Multi2resolution distance map based small target detection in infrared image [J]. *Acta Electronica Sinica*. 2002, **30**(1): 42~45.
- [28] Li Hong, Zheng Chengyong, Gao Jingli. Detecting small moving object based on wavelet multi2scale image registration[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2003, **32**(3): 268~270.
- [29] Li Hongyan, Wu Chengke. Detecting dim small targets in image sequences based on wavelet transforms and genetic algorithms[J]. *Acta Electronica Sinica*. 2001, **29**(4): 439~442.
- [30] Davidson G, Griffiths H D. Wavelet detection scheme for small target in sea clutter [J]. *IEE Electronics Letters*. 2002, **38**(19): 1128~1130.
- [31] Giuseppe Boccignone. Small target detection using wavelets[A]. IEEE 1998 Fourteenth International Conference on Pattern Recognition[C]. 1998: 1776~1778.
- [32] 周 杰, 彭嘉雄, 等. 方向小波变换及其在运动弱目标检测中的应用[J]. *信息与控制*. 1996, **25**(1).
- [33] 周 杰, 彭嘉雄, 等. 基于小波变换的运动点目标检测方法[J]. *宇航学报*. 1996, **17**(3).
- [34] David Casasent and Anqi Ye. Detection Filters and Algorithm Fusion for ATR[J]. *IEEE Transaction on image processing*. 1977, **6**(1): 114~125.
- [35] Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*[M]. Academic Press. 1982.
- [36] John T. Barnett, Barton D. Billard, Change Lee. Nonlinear morphological processors for point-target detection versus an adaptive linear spatial filter: a performance comparison[A]. *Signal and Data Processing of Small Targets 1993 Meeting, SPIE*[C]. **1954**.
- [37] Jean-Francois Rivest. Roger Fortin. Detection of dim targets in digital infrared imagery by morphological processing[J]. *Optecal Engineering*. 1996, **35**(7): 1886~1893.
- [38] Victor T. Tom, Tamar Peli, May Leung, Joseph E. Bondaryk. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds[A]. *Signal and Data Processing of Small Targets 1993 Meeting, SPIE*[C]. **1954**: 2~11.
- [39] Raphael Horak, Juliette Mattioli. Target detection of very dim objects using gray-level morphologic tophat[A]. *SPIE*[C]. 1996, **2785**: 105~116.
- [40] Cheng F, Venetsanopoulos A N. An Adaptive Morphological Filter for Image Processing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*. 1992, **1**(4): 533~539.
- [41] Tom V T, Peli T, Leung M, et al.. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds[A]. *SPIE*[C]. 1993, **1954**: 2~11.
- [42] Steve Hay, McKeeman, Dale Van Cleave. Evaluation of infrared missile warning algorithm suites[A]. *Aerospace and Electronics Conference*[C]. 1993, NAECON.
- [43] Choi Jae-ho, Jang Jong-whan, Lee Seung-phil, et al.. Multiple moving object estimation in image sequences of natural scene[J]. *Opt Eng*. 1997, **36**(8): 2176~2183.
- [44] ChanDavidSK, LanganDavidA, StaverDanielA. Spatial processing techniques for detection of small targets in IR clutter[A]. *SPIE*[C]. 1990, **1305**: 53~62.
- [45] Nishiguchi K, Kobayashi M, Ichikawa A. Small target detection from image using recursive max filter[A]. *SPIE*[C]. 1995, **2561**: 153~165.
- [46] Barniv Y. Dynamic programming solution for detection dim moving targets[J]. *IEEE Trans AES*. 1985, **21**(1): 144~155.
- [47] lion R, Inifo M R, Azimisadjad E S. Dim target detection using high order correlation method[J]. *IEEE Transaction Aerospace Election System*. 1994, **29**(1): 197~212.
- [48] Blostein S D, Huang T S. Detection of small moving objects in image sequences using multistage hypothesis testing[J]. *IEEE ICASSP*. 1988: 1068~1071.
- [49] Bronskill J F, Hepburn J S A, Au W K. A knowledge-based approach to the detection, tracking, and classification of target formations, in infrared image sequences[A]. *Proc. IEEE CVPR*[C]. 1989: 153~158.
- [50] Lavagetto F. Automatic target detection in infrared sequences through semantic labeling[A]. *SPIE*[J]. 1990, **1349**: 476~485.
- [51] Wang G, Rafact I M, McVey E S. A Pipeline Algorithm for Detection and Tracking of Pixel-Sized Target Trajectories[A]. *SPIE*[C]. 1990, **1305**: 167~176.
- [52] Diani M, CorsiniG Baldacci A. Space-time processing for the detection of airborne targets in IR image sequences LEE Proceedings of Vision[J]. *Image and Signal Processing*. 2001, **148**(3): 151~157.