

文章编号 1004-924X(2010)03-0741-07

红外点目标检测中的能量累积

曹琦¹, 王德江², 张齐¹, 毕笃彦¹

- (1. 空军工程学院 信号与信息处理实验室, 陕西 西安 710038;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对在红外图像目标检测中利用传统动态规划进行能量累积存在较大的能量扩散效应, 且检测速度慢、检测概率低等问题提出了一种基于动态规划的红外点目标检测能量累积方法。该方法在传统的动态规划递推式中引入了加权信息熵衰减因子和方向性信息权值。加权信息熵可以反映目标的运动信息, 当某搜索区域存在目标运动时, 能量累积衰减率小; 当目标不存在时, 能量累积衰减率大, 从而保证了目标轨迹区域能量的大幅累积。方向性信息能够反映目标的运动轨迹方向, 能使能量以大概率沿着目标运动方向有效累积。用本文方法和传统的 DPA 能量累积方法对平均信噪比为 2.172 5 的 12 帧序列图像进行实验和比较, 结果显示, 传统 DPA 能量累积要到第 9 帧才能到达检测阈值, 检测概率为 0.956, 并且会产生虚假轨迹; 而本文方法到第 5 帧就已经到达检测阈值, 检测概率为 0.915。结果表明, 该方法缩小了能量扩散效应区域, 提高了点目标的检测概率和检测速度。

关键词: 目标检测; 动态规划; 能量累积; 加权信息熵; 方向性信息加权

中图分类号: TP391; TN219 **文献标识码:** A

Energy accumulation in infrared point target detection

CAO Qi¹, WANG De-jiang², ZHANG Qi¹, BI Du-yan¹

- (1. *Signal and Information Processing Laboratory, Air Force Engineering College, Xi'an 710038, China;*
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: To overcome the shortcomings of large energy distraction, slow detection speed and low detection probability in target detection using the technique of energy accumulation based on traditional Dynamic Programming Algorithm (DPA), an energy accumulation method of IR point target detection based on DPA is proposed. The Weighted Information Entropy (WIE) attenuation factor and directional weights are imported into the DPA recursive formula. Research results indicate that the WIE can reflect the targets' moving information. When a target exists in the searching window, accumulated energy shows a little attenuation, which guarantees the larger energy accumulation and less energy distraction in the area of target track. Moreover, directional weights can reflect the moving direction of a target and make the energy accumulation toward the moving direction with a large probability. An experiment is carried out for 12 frames of image sequences with the average SNR of 2.172 5. Results show that the accumulated energy reaches the detecting threshold in the 5th frame with the detection probability of 0.915 by using the proposed method, while the energy reaches the

收稿日期: 2009-05-31; 修订日期: 2009-08-18.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA701206)

threshold in the 9th frame with the detection probability of 0.956 by using the traditional method. It is concluded that the method is able to reduce the area of energy distraction tremendously and can increase the detecting probability and speed obviously.

Key words: target detection; dynamic programming; energy accumulation; WIE attenuation factor; directional weight

1 引言

现代高科技战争要求在很远距离处就能发现目标。然而,获得的远距离图像目标成像面积很小,同时被大量噪声所淹没,致使图像的信噪比(SNR)极低,小目标检测工作变得异常困难。随着研究的不断深入,检测与跟踪之间的界限越来越不明显。在图像序列跟踪中,当目标弱到难以提供比较有效的预检测时,一些检测算法采用首先对估计的轨迹进行检测判决的方法来实现小目标沿轨迹的累积,提高了检测性能,因此,先跟踪后检测(TBD)方法应运而生。

典型的 TBD 方法是动态规划法(DPA)。DPA 结构简单,能够以递归的形式处理序列图像,可以检测在任意时刻、任意位置出现,运动速度范围较大的点目标。该方法最早由 Yair Bar-niv^[1-2]用在小目标检测中,随后,Arnold^[3]进一步发展了这类算法,能够检测到 0 dB 以下的目标,但这类算法适用于非起伏模型目标,对于起伏目标模型处理效果较差。Tonissen 等人^[4]直接利用假设目标的幅度信息构造值函数,可以检测起伏模型的运动目标,但该算法虽然具有良好的检测目标的性能,跟踪性能却很差。陈尚峰等^[5]在动态规划中引入加权的思想,很好地控制了能量累积的方向。

动态规划中直接累积像素灰度能量会产生能量扩散效应^[6],在累加得到的指标函数图像中的真实目标点的周围会出现能量团聚斑块。对指标函数图像进行阈值分割后这些团聚斑块会在目标点周围形成数目较多的虚警点,使得后续算法无法正确搜索到目标的位置点,造成算法失效。针对这些不足,本文引入了加权熵遗忘因子,自适应地调整能量累积过程;同时在指标函数中引入方向预测权函数,使能量以大概率在目标运动轨迹

上积累,从而,得到了一个检测功能强,容易实现的低信噪比目标多帧检测方法。

2 能量累积检测模型

目标能量累积算法可表述为:在序列图像中寻找目标运动的路径,将目标能量沿其路径进行累积,以提高目标的信噪比。设连续一段图像序列中目标轨迹或者目标状态序列为: $X_k = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, 在各帧图像中目标的强度值为 $f(x_k)$ 。目标检测问题等于从观测轨迹集中选择一条轨迹 $Z_k = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$, 使沿轨迹积累的能量达到最大。文献[3]将此问题看成是一阶 Markov 模型而使用基于动态规划原理的方法解决此问题。基于的动态规划原理是:对于最优策略过程中的任一状态而言,无论其过去的状态和决策如何,其余下的诸决策必构成一个最优子策略。求解最优化状态序列的过程可表示为^[2]:

$$h_{k-1}(\theta_k) = \max_{\theta_{k-1}} [h_{k-2}(\theta_{k-1}) + s_k(\theta_k, \theta_{k-1})], \quad (1)$$

其中, k 为阶段变量,对应于序列图像中的帧序号。 θ_k 为状态变量,在 k 阶段时,目标的状态变量 θ_k 为该阶段可能位置坐标 (i_k, j_k) 的集合。若目标的帧间运动速度不超过一个像素,则在第 k 阶段时,目标的状态变量集合为:

$$\theta_k = (i_k, j_k) = (i_{k-1} \pm 1, j_{k-1} \pm 1), \quad (2)$$

$h_{k-1}(\theta_k)$ 为指标函数,其初值为 $h_1(\theta_2) = \max_{\theta_{k-1}} [s_1(\theta_2, \theta_2)]$, 用以衡量和评价所选取策略的效果的数量函数,它定义为目标在各运动状态时对应像素强度的累加。设目标在第 k 帧时的强度值为 $f(\theta_k)$, 则指标函数为:

$$h_{k-1}(\theta_k) = \sum_{l=1}^{k-1} f(\theta_l), \quad (3)$$

$s_k(\theta_k, \theta_{k-1})$ 为状态转移代价函数,定义为目标从状态 θ_{k-1} 转移到状态 θ_k 时为指标函数带来的效益。此时,它等于目标在第 $k-1$ 帧图像中像

素的强度值 $f(\theta_{k-1})$ 。

根据上述定义和说明,并使用直角坐标系代替(1)式各项,有

$$h_{k-1}(i_k, j_k) = \begin{cases} h_0(i_1, j_1) = \max_{D_0(i_1, j_1)} f(i_1, j_1) & k=1 \\ f(i_k, j_k) + \max_{D_{k-1}(i_k, j_k)} \{h_{k-2}(i_{k-1}, j_{k-1})\} & k=2, \dots, K_p \end{cases} \quad (4)$$

其中, K_p 为最大帧数。 $D_{k-1}(i_k, j_k)$ 表示目标转移到状态 θ_k 时所有可能的状态 θ_{k-1} 的坐标组成的集合。当目标运动速度最大为 1 frame/s 时, $D_{k-1}(i_k, j_k) = \{(i_k + \delta_i, j_k + \delta_j) \mid \delta_i, \delta_j = -1, 0, 1\}$ 。当 $h_{k-1}(i_k, j_k) \geq V_T$ 时, 检测为有目标, 否则不存在目标。从(4)式可以看出, 基于动态规划的能量累积过程实际上可以看成是一个递归最大值滤波过程, 因此可以使用递归最大值滤波器实现基于动态规划的能量累积算法^[6-7]。

3 有效能量累积

利用上述动态规划方法进行能量累积时, 会出现以下几个问题。1. 当累加图像的帧数较长时, 指标函数中目标的能量变得很高, 因而当前输入图像中目标的幅度对目标能量累加值的影响程度变小, 以至于无法反映当前目标强度的变化带来的影响^[3]。2. 在累加得到的指标函数图像中的真实目标点的周围会出现能量团聚斑块——能量扩散。对指标函数图像进行阈值分割后这些团聚斑块会在目标点周围形成数目较多的虚警点, 使得后续算法无法正确搜索到目标的位置点, 造成算法失效^[5]。3. 受到目标附近干扰噪声点的影响, 搜索到的目标轨迹可能完全由噪声点组成, 造成算法失效^[6]。这是由于能量没有有效积累造成的, 所谓有效积累就是指能量沿着目标轨迹进行积累。

要解决利用动态规划进行能量累积的问题可以通过以下途径: 1. 在动态规划递推式中引入能量衰减因子, 使扩散的能量迅速的衰减。2. 引入方向预测性信息, 使能量累积能够沿着目标运动方向。因此我们将式(4)改成:

$$h_{k-1}(i_k, j_k) = \alpha(i_k, j_k) f(i_k, j_k) + \max_{D_{k-1}(i_k, j_k)} \{\omega(i_{k-1}, j_{k-1}) h_{k-2}(i_{k-1}, j_{k-1})\}, \quad (5)$$

$$\text{当 } k=1 \text{ 时, } h_0(i_1, j_1) = \max_{D_0(i_1, j_1)} f(i_1, j_1)。$$

规定衰减因子 α 为 $0 \leq \alpha \leq 1$, $\omega(i_{k-1}, j_{k-1})$ 表示第 $k-1$ 阶段的指标函数的权, 其中包含了方向信息。如何自适应的确定衰减因子和指标权值是影响能量累积的一个重要因素, 衰减因子和指标权值的设计既要反映目标的运动, 又要反映目标的运动方向才能保证能量沿目标轨迹进行有效地积累。下面我们将分别设计衰减因子和指标加权函数。

3.1 加权信息熵衰减因子

信息熵是描述图像中所含信息量的有效途径。当运动目标沿着某方向运动时, 会引起运动轨迹周围固定窗口内信息熵的变化。从另外一个角度讲, 在以当前帧某点 (i_k, j_k) 为中心的窗口内出现了目标, 而前一帧图像以点 (i_{k-1}, j_{k-1}) 为中心的窗口没有出现目标, 则此窗口前后帧必存在一个熵差。

图像的信息熵能有效地表达出图像中所包含的平均信息量, 但它也忽视了图像中灰度信息本身的重要性, 为了体现灰度部分对于小目标检测的贡献, 我们选择加权信息熵^[8]来确定衰减因子 α 。对于一幅具有 n 个灰度级的红外图像, 设 p_s 是图像中灰度值 s 出现的概率, S 是由此红外图像中所含像素值所组成的集合, 则 S 的概率空间可表述为

$$[S \cdot P]: \begin{cases} S: & 0 & 1 & \dots & s & \dots & n-1 \\ P(S): & p_0 & p_1 & \dots & p_s & \dots & p_{n-1} \end{cases}, \quad (6)$$

其中, $0 \leq p_s \leq 1 (s=0, 1, \dots, n-1)$; $\sum_{s=0}^{n-1} p_s = 1$ 。定义加权信息熵(Weighted Information Entropy)为:

$$\text{WIE}(S) = - \sum_{s=0}^{255} s \cdot p_s \log p_s, \quad (7)$$

如果某红外图像中含有 r 种像素灰度值 s_1, s_2, \dots, s_r , 此加权信息熵存在一个最大值 $\text{WIE}_{\max} = \beta + \sum_{m=1}^r s_m \exp(-\frac{\beta}{s_m} - 1)$ ^[9]。此时我们定义加权信息熵衰减因子(WIE- α)为:

$$\alpha(i_k, j_k) = \left| \frac{\text{WIE}(D(i_k, j_k)) - \text{WIE}(D(i_{k-1}, j_{k-1}))}{\text{WIE}_{\max}} \right|, \quad (8)$$

其中, $D(i_k, j_k)$ 表示第 k 帧, 以点 (i_k, j_k) 为中

心的窗口。将式(8)代入式(5)可知,如果前一帧图像某窗口未出现目标,而在当前帧此窗口出现目标时, $\alpha(i_k, j_k)$ 值较大,从而对能量会有较多的积累;如果前帧和当前帧窗口都没有出现目标,则 $\alpha(i_k, j_k)$ 值很小,能量积累衰减较大;如果,前一帧窗口出现目标,且当前帧窗口目标仍存在, $\alpha(i_k, j_k)$ 值也较小,此时能量累积效果不好。因此,本文能量累积检测方法对速动点目标具有较好的检测效果。

3.2 方向性信息加权

目标能量扩散现象发生的根本原因在于,前一帧指标函数图像中以目标点为中心的速度搜索窗内的所有像素点转移到当前帧图像中目标点的概率都是相同的,实际上这是非常不合理的。根据目标运动轨迹的连续性,前一帧指标函数图像中对应的速度搜索窗内不同像素点移动到该像素点的概率是不应该相同的,只有那些与运动方向匹配和处于速度机动范围内的目标点才有可能转移到当前帧图像中的像素位置。

在进行轨迹预测时,我们认为其在短时间内保持直线运动。如式(5)所示,以当前帧 k , 点 (i_k, j_k) 为参考,必能在前一帧 $k-1$ 以点 (i_{k-1}, j_{k-1}) 为中心的窗口中找到一个最大的 $h_{k-2}(i_{k-1}, j_{k-1})$, 以这个最大点为参考,在 $k-2$ 帧也能找到一个最大的 $h_{k-3}(i_{k-2}, j_{k-2})$, 依次将寻找的最大点 $T_l = \{(i_1^l, j_1^l), (i_2^l, j_2^l), \dots, (i_{k-1}^l, j_{k-1}^l)\}$ 组成一条轨迹,此轨迹为可能目标轨迹。这样,以当前帧 k , 点 (i_k, j_k) 为参考,在前一帧 $k-1$ 的窗口内的每一个点都可以构成一条轨迹,窗口内轨迹的集合为 $T = \{T_l | l=1, 2, \dots, N\}$, 其中 N 为窗口像素个数。这些轨迹转移到当前帧图像中目标点 (i_k, j_k) 的概率并不相同,将轨迹上的点做直线拟合,如果点 (i_k, j_k) 在拟合出来的直线上,此时认为转移概率是最大的。否则,点 (i_k, j_k) 和前一帧的点 (i_{k-1}, j_{k-1}) 连接成的直线与拟合出来的直接必有

一个夹角 θ_l 。如图 1 所示。如果搜索窗口为 3×3 , 则拟合出来的轨迹方向如图 2 所示。

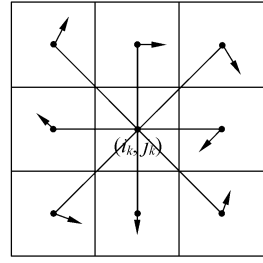


图 2 搜索窗口内拟合轨迹方向示意图

Fig. 2 Direction of track in searching window

我们采用线性最小二乘拟合方法来拟合轨迹 T_l 。采用线性最小二乘拟合目标点后得到的直线方程(以 x 坐标为例, y 坐标类似)为:

$$x = a + b \cdot t, \quad (9)$$

根据误差最小准则,解得:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{t=1}^{k-1} t^2 \sum_{t=1}^{k-1} i_t - \sum_{t=1}^{k-1} t \sum_{t=1}^{k-1} i_t t}{(k-1) \sum_{t=1}^{k-1} t^2 - \sum_{t=1}^{k-1} t^2}, \quad (10)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{t=1}^{k-1} t \sum_{t=1}^{k-1} x_t - (k-1) \sum_{t=1}^{k-1} x_t t}{(k-1) \sum_{t=1}^{k-1} t^2 - \sum_{t=1}^{k-1} t^2}, \quad (11)$$

轨迹拟合出来之后,令(5)式中 $\omega(i_{k-1}, j_{k-1}) = \left| \frac{\theta_l - \pi}{\pi} \right|$, 其中 $l=1, 2, \dots, N$, 可知 $0 \leq \omega(i_{k-1}, j_{k-1}) \leq 1$ 。这样,如果当前帧点 (i_k, j_k) 在拟合直线方向上, $\theta_l=0$, 此时赋予权值 $\omega(i_{k-1}, j_{k-1})=1$, 此时权值最大;如果当前帧点 (i_k, j_k) 在拟合直线反方向上, $\theta_l=\pi$, 此时赋予权值 $\omega(i_{k-1}, j_{k-1})=0$, 此时权值最小。

3.3 能量累积步骤

(1)初始化:当 $k=1$ 时,对图像中所有像素点有 $h_0(i_1, j_1) = f(i_1, j_1)$ 。

(2)递归计算: $2 \leq k \leq K_p$, $D_{k-1}(i_k, j_k) = \{(i_k + \delta_i, j_k + \delta_j) | \delta_i, \delta_j = -1, 0, 1\}$, 为 3×3 的搜索窗。对当前帧每一点按照公式(8)计算加权信息熵衰减因子 $\alpha(i_k, j_k)$, 计算前一帧窗口内指标函数的加权值 $\omega(i_{k-1}, j_{k-1}) = \left| \frac{\theta_l - \pi}{\pi} \right|$ 。加权信息熵衰减因子和方向性信息加权代入公式(4)。

(3)阈值分割:根据系统要求的虚警点数,确

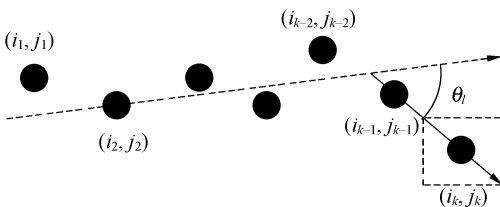


图 1 轨迹方向性信息

Fig. 1 Directional information of track

定累加帧图像的阈限为 V_T , 则分割出候选目标的坐标为: $\{\hat{i}_{K_p}, \hat{j}_{K_p}\} = \{(i_{K_p}, j_{K_p}) | h_{K_p-1}(i_{K_p}, j_{K_p}) \geq V_T\}$

4 实验结果与分析

实验图像为天空背景下的低信噪比小目标图像序列, 如图 3(a)所示, 图像分辨率为 256×256 , 含有一个小目标, 共选择了连续的 12 帧图像进行能量累积实验, 各帧图像目标信噪比见表 1; 目标运动速度 < 1 frame/s, 选择目标搜索窗口大小为 3×3 。

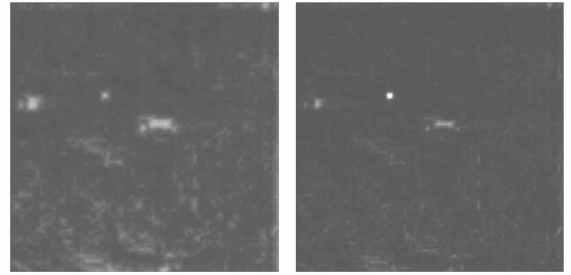
累加帧图像阈限 V_T 由公式(12)确定^[10]:

$$V_T = K_p m + K_p A - \lambda \cdot \sqrt{K_p} \sigma, \quad (12)$$

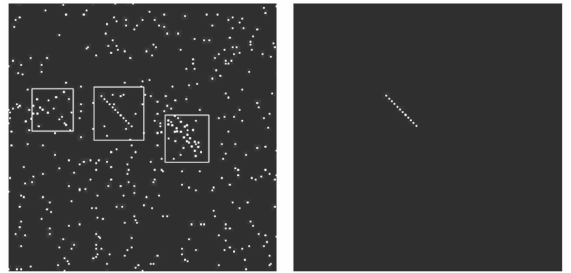
其中, K_p 为累加的帧数; m 为像素平均灰度; σ 为图像方差; $A = SNR \cdot \sigma$, SNR 取为 12 帧图像的平均信噪比 2.172 5; λ 为待定常数, 它由检测虚警概率 P_f 决定, $\int_{\lambda}^{+\infty} f(z/H_0) dz = P_f$, 其中, $f(z/H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{z^2}{2})$, 此时我们假设图像随机噪声服从零均值的高斯分布。

实验结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 传统的动态规划能量累积存在较为明显的能量扩散效应, 如图 3(b)所示, 将本文的加权信息熵遗忘引子加入后, 能量扩散效应大大的减弱, 但是会存在一部分噪声累积, 如图 3(c)所示。如果, 我们将方向预测性信息引入动态规划算法, 由于噪声不存在方向性, 而目标点运动存在方向性, 因此目标能量累积效果较明显。如图 3(d)所示。利用传统 DPA 算法检测到的目标轨迹会有虚假轨迹, 它主要是由于噪声能量累



(c)引入 WIE 衰减因子后 能量累积图 (d)引入 WIE 衰减因子和方向信息权值后能量累积图
(c)Energy accumulation with WIE attenuation factor (d)Energy accumulation with WIE attenuation factor and directional weights



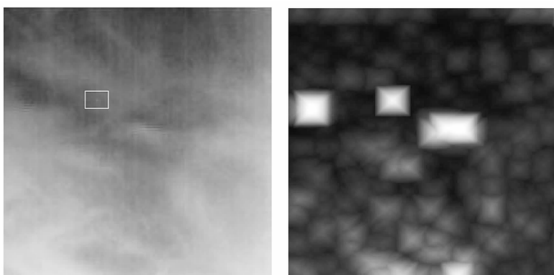
(e)传统 DPA 轨迹检测结果 (f)本文方法轨迹检测结果
(e) Track detection by traditional DPA (f) Track detection by proposed method

图 3 实验结果

Fig. 3 Experimental results

积值高于阈值所引起的, 而本文提出的能量累积方法能将目标能量累积到一个较高的值, 因此不会出现虚假轨迹。如图 3(e) (f)所示。

实验中抽取目标点和某噪声点, 将其能量累积过程绘制成图 4 所示。从图 4 可以看出, 传统 DPA 能量累积要到第 9 帧才能到达检测阈值, 而



(a) 图像序列的第一帧图像 (b) 传统 DPA 能量累积图
(a) The first frame of image sequence (b) Traditional DPA energy accumulation

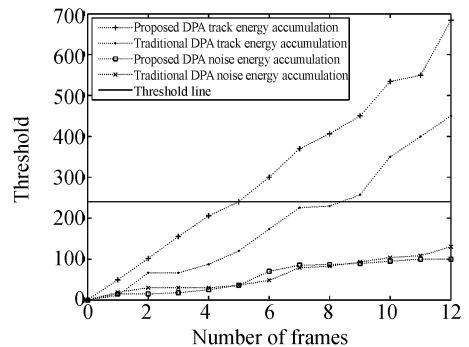


图 4 能量累积过程

Fig. 4 Process of energy accumulation

本文方法到第 5 帧就已经到达检测阈值,检测速度有较大的提高。本文方法和传统 DPA 对噪声能量累积效果不明显。

实验中,我们选取恒虚警概率为 0.01,此时 $\lambda = 1.8$ 。检测概率 $P_d = \text{目标轨迹检测次数} / \text{总实验次数}$ 。表 1 给出了不同虚警概率要求下 1 000 次实验的检测平均结果。

表 1 能量累积过程中检测概率

Tab. 1 Detection probability in energy accumulation

Frame No.	1	2	3	4	5	6
SNR	2.18	2.23	2.13	2.35	2.31	2.06
Traditional DPA	0	0.003	0.283	0.492	0.533	0.776
Proposed DPA	0	0.009	0.376	0.688	0.915	0.934
Frame No.	7	8	9	10	11	12
SNR	1.87	2.15	2.06	2.53	2.22	1.98
Traditional DPA	0.818	0.896	0.956	0.989	0.999	0.999
Proposed DPA	0.993	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999

从表 1 可以看出,运用传统的动态规划方法

检测目标轨迹,能量要累积到第 9 帧时才会达到较高的检测概率,而用本文的方法到第 5 帧就可以目标区域就可以累积到较高的能量,达到较高的检测概率。

5 结 论

采用动态规划进行能量累积的小目标检测方法是一种检测前跟踪方法,其操作是像素级的,有利于硬件实现。针对传统动态规划在实时红外检测中的不足,本文提出了一种利用红外图像加权信息熵和方向信息的动态规划能量累积方法。用本文方法和传统的 DPA 能量累积方法对平均信噪比为 2.172 5 的 12 帧序列图像进行了实验和比较,结果显示,传统 DPA 能量累积要到第 9 帧才能到达检测阈值,检测概率为 0.956,并且会产生虚假轨迹;而本文方法到第 5 帧就已经到达检测阈值,检测概率为 0.915。该方法的特点是:将加权信息熵衰减因子引入动态规划中,体现了目标的运动信息,有效地抑制了能量扩散效应;将目标运动方向性信息加权方法引入动态规划中,提高了小目标的检测概率和速度。

参考文献:

- [1] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1985, 21: 144-156.
- [2] BARNIV Y, KELLA O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets Part II: Analysis[J]. *IEEE Trans. on AES*, 1987, 23: 776-788.
- [3] ARNOLD J, SHAW S, ASTERNACK H. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1993, 29: 44-56.
- [4] TONISSEN S M, EVANS R J. Target tracking using dynamic programming: Algorithm and performance[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, 1995, 3: 2741-2746.
- [5] 陈尚锋, 肖山竹, 卢焕章. 图像序列弱小目标能量积累检测研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 23(2): 288-291.
- [6] 潘巧海, 李东晓, 姚庆栋, 等. 基于最大值递归滤波器的暗点目标检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2000, 19(3): 224-228.
- [7] PAN Q H, LI D X, YAO Q D, et al.. Dim point target detection algorithm based on recursive max filter[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2000, 19(3): 224-228. (in Chinese)
- [8] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M, ICHIKAWA A. Small target detection from image sequences using recursive max filter[J]. *SPIE*, 2561, 1995: 153-166.
- [9] YANG L, ZHOU Y, YANG J. Variance WIE based infrared images processing[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(15): 857-859.
- [10] 杨磊. 复杂背景条件下的红外小目标检测与跟踪算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006: 30-34.
- [11] YANG L. *Study on infrared small target detection and tracking algorithm under complex backgrounds*[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2009.

sity, 2006:30-34. (in Chinese)

- [10] 黄林梅. 低信噪比红外弱小运动目标先跟踪后检测(TBD)的检测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004:30-32.

HUANG L M. *Research on track-before-detection algorithm for infrared target detection*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2004:30-32. (in Chinese)

作者简介:



曹琦(1982-),男,湖南长沙人,博士研究生,2007年于空军工程大学获得硕士学位,主要研究方向为红外小目标检测与识别。E-mail: cq_surpass@126.com



张齐(1982-),男,陕西西安人,博士研究生,2007年于空军工程大学获得硕士学位,主要从事SAR图像目标检测的研究。E-mail: zhangqihot@sina.com



王德江(1981-),男,黑龙江双鸭山人,助理研究员,博士研究生,2004年于南开大学获学士学位,2007年于清华大学获硕士学位,主要从事航空相机的研究和研制。E-mail: wangdj04@live.cn

导师简介:



毕笃彦(1962-),男,陕西西安人,博士生导师,教授,1983年、1986年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,1997年于法国图尔大学获得博士学位,主要从事图像处理、图像传输和图像识别方面的研究。E-mail: biduyan@126.com

●下期预告

变焦距镜头凸轮结构优化设计

王平¹,张葆¹,程志峰^{1,2},赵阳²

(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;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

变焦距镜头普遍采用机械补偿法来改变焦距,即通过变焦凸轮转动以驱动变倍组和补偿组在光轴方向上的移动,从而改变焦距的大小。变焦凸轮是变焦距镜头实现连续变焦的关键。为了满足某一指标对变焦距镜头质量和体积的严格要求,本文采用NX/Nastran软件对变焦凸轮结构进行了仿真分析,并针对分析结果对变焦凸轮结构进行了优化设计,最终的优化结果使变焦凸轮质量减小了88g,壁厚减小了1.5mm,外径尺寸减小了3mm。对优化后的变焦凸轮进行了模态分析和热分析。模态分析表明:凸轮主体一阶频率为50.3Hz;热分析显示凸轮在90℃温差作用下变形大小为0.006mm。最后通过光学传递函数检测、振动和高低温试验验证了仿真分析的正确性,表明对变焦凸轮的优化设计是成功的。