

文章编号 1004-924X(2010)02-0477-08

空间小目标动态规划检测

王学伟¹, 王春歆¹, 张玉叶^{1,2}, 徐景硕²

- (1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要:为了从序列图像中检测出空间小目标,提出了一种改进的动态规划算法。介绍了动态规划小目标检测算法的发展过程。针对工程应用中为了获取亚像素质心而对图像散焦处理的情况,对原算法的评价函数递归方程进行改进,提出用方向加权的多点能量累积代替原算法的单个累积,并将多速度平面分别计算的方式简化为速度初始化与历史速度修正方式。最后,针对算法实现过程中遇到的初始状态计算、恒虚警阈值以及轨迹数据结构等关键问题进行了说明。在实验参数条件下,计算量比原算法减少了约50%。实摄图实验结果表明,方向加权的多点累积算法5帧即可检测出目标,而原算法在第10帧时仍有大量虚假轨迹;在第5帧的20条最大评价价值轨迹中,多点法的评价价值信噪比比原算法提高42%。方向加权的多点累积算法可以有效抑制孤立噪声点产生的虚警,提高算法的检测能力。

关键词:动态规划;小目标检测;多点累积;空间图像

中图分类号:TP391.41;V557.3 **文献标识码:**A

Detection of small space target by dynamic programming

WANG Xue-wei¹, WANG Chun-xin¹, ZHANG Yu-ye^{1,2}, XU Jing-shuo²

- (1. *Control Engineering Department, Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China*;
2. *Qingdao Branch, Navy Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China*)

Abstract: An improved dynamic programming algorithm was presented to detect space small targets from sequence images. Firstly, the development and current situation of the dynamic programming algorithm used in small target detections were introduced. As the defocus was used to process commonly a project to obtain the sub-pixel center of a target, the recursive equation of score function was improved. A multi-point accumulation algorithm with direction weight was presented to replace the single-point accumulation in an original algorithm, and the original multispeed plane calculation was also simplified. Finally, the key processes including state initialization, constant false alarm rate threshold and track data structure were discussed. The analysis indicates that the computational complexity has reduced about 50% as compared with that of original algorithm. Experimental results also indicate that targets can be detected in 5th frame with the multi-point algorithm, while a number of fake tracks

收稿日期:2008-11-04;修订日期:2008-12-05.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA703213D)

are found until the 10th frame with the original algorithm. Furthermore, the score SNR of 20 tracks with maximum score in the 5th frame of multi-point algorithm is 0.87 higher than that of original algorithm. The multi-point accumulation algorithm with direction weight is able to reduce the false alarm caused by a speckle noise efficiently and to raise the detection ability of dynamic programming.

Key words: dynamic programming; small target detection; multi-point accumulation; space image

1 引言

空间小目标检测是根据观测的序列图像对太空目标进行搜索定位。这种图像以深空为背景,其目标与相机距离较远,通过反射太阳光成像,所以在图像中呈弱小点状。与一般的小目标图像相比,该类图像中目标、恒星和噪声特征相似,并且由于相机装载平台的运动,导致图像中大量恒星也处于运动之中,所以利用传统的小目标检测方法,难以区分恒星和目标,必须针对这类空间小目标研究有效的检测方法。

小目标检测的方法很多^[1-3],1985年BARNIV提出的动态规划法(Dynamic Programming Algorithm, DPA)^[4-5]就是重要的方法之一。该方法针对低信噪比的星载下视固定点序列图像,通过迭代求取最大化局部代价函数,得到了序列图像中最有可能由目标产生的轨迹,将理想的穷举搜索转换为分段最优化过程。由于利用全部序列图像信息先跟踪后检测(TBD),克服了以往先检测后跟踪方法容易丢失信息的弊端。1993年JAMES对这一方法进行了改进^[6],将代价函数迭代公式中似然函数修改为对数似然比函数,增加了非目标假设的约束,使得代价函数能够更好地适应非高斯噪声模型,特别是在存在大量亮噪声点图像中,当使用基于高斯噪声的似然函数时,少量的奇异点将支配累积的轨迹评价值,而似然比函数在目标灰度附近存在的峰值可以弱化奇异量测值,从而增加系统对脉冲噪声的鲁棒性。JAMES还创造了帧内DP计算方法,使计算量减少了一个数量级。1996年TONISSEN对DPA进行了简化^[7],将量测和作为代价函数,省去了迭代过程中复杂的转移函数和似然函数计算。他还 将轨迹检测概率分为一般检测概率和精确检测概率,预测了给定目标灰度、转移数和处理帧数情况下的DPA,分析了算法跟踪性能。经过分析后,

得出对于已知的目标机动范围,存在一个信噪比(SNR)限制,当低于这个值时无论如何增加处理帧数也不可能检测出目标的结论;另外,在性能分析时假设代价函数之间独立同分布(IID)将产生较大的误差。2000年JOHNSTON等人^[8-9]也发现灰度和代价函数的IID和高斯假设不符合实际情况,由此假设计算出的虚警率不准确。针对这一问题,JOHNSTON利用极值理论对TONISSEN的方法重新进行了分析,得到了DPA的检测概率和虚警率的解析解。与以往文献相比,这一分析方法不需要代价函数IID和高斯分布的错误假设,而且分析结果也更精确地接近仿真实验结果。目前,BARNIV、JAMES和TONISSEN的3种方法是DPA研究的基础,其它文献都是在这3种方法基础上发展而来。

1995年文献[10]将BARNIV的方法引入国内,以灰度和代价函数为高斯分布假定为基础确定了门限阈值与虚警率之间的关系,虽然这后来被证明误差较大但是却为研究者们提供了一种简便概略的参数设置方法。2002年李士民等人^[11]将JAMES的方法应用于云天背景中飞行目标的可见光序列图像。2003年陈尚锋和陈华明等人^[12-13]以TONISSEN的方法为基础,在递归方程中增加了方向系数来减小计算量和虚警点数,对阶段检测结果增加了轨迹关联和置信度检验处理,但是仍然需要已知目标帧间位移,而且帧间位移必须较小(<1 pixel)才能保证算法的性能。同年,文献[14]提出用似然差代替JAMES方法的似然比,相邻帧量测权值差作为惩罚函数(状态转移概率)。该方法虽然具有一定的创新性,但由于直接对JAMES方法递归公式中的似然比函数进行了修改,缺乏完整的理论支撑,算法性能未见明显提高。2004年文献[15]认为陈尚锋的方向预测加权方法预测方向不够准确,改用LS线形预测来提高预测方向的精度。2008年文献[16]在陈尚锋方法的基础上增加了对目标灰度一致性的

判断。

目前关于 DPA 的研究主要是以仿真实验为主,除 JAMES 和李士民等人的文献简要提及实用结果外,鲜见于工程应用。本文将 TONISSEN 的方法应用于空间小目标检测,并针对工程应用中的图像散焦处理,对递归方程进行改进,降低算法对孤立亮点的敏感程度;简化原算法的多速度平面递归过程,减少计算量;详细说明数据结构、初始计算以及恒虚警阈值等实际应用中遇到的问题。最后通过实摄图像对单点累积方法和多点累积方法进行对比实验,证明本文方法的有效性。

2 DPA 的数学描述

理想的小目标检测方法是搜索序列图像中全部可能的轨迹,根据连续性和一致性寻找真实目标。而 DPA 的本质是将不可行的穷举搜索视为马尔可夫过程,通过分段最优化解决小目标检测的穷举搜索问题。

2.1 目标运动模型

DPA 将整个图像序列的搜索过程分为 K 个阶段,假定目标匀速直线运动,目标运动模型为^[8]:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_k, \quad k=1, \dots, K, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, u_k, v_k)^T$ 为位置和速度构成的 k 阶段目标状态向量,状态转移矩阵 \mathbf{F} 为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, T 为相邻两阶段的时间差。量测模型表示为:

$$z_k(i, j) = \begin{cases} A_k + \omega_k(i, j) \\ \omega_k(i, j) \end{cases}. \quad (3)$$

分别为存在目标和只有噪声时的量测值,其中 A_k 是目标灰度, $\omega_k(i, j) \sim N(0, \sigma_{\omega}^2)$ 假定为 IID 的加性高斯噪声。

2.2 评价函数递归和回溯

为了找到所有轨迹中的真实目标轨迹,设定一个评价函数 I ,使得真实目标对应的评价函数

值最大。由于假定搜索过程为马尔可夫的,因此 I 的最大值可通过递归求解各个阶段评价函数的最大值求得,递归方程表示为^[9]:

$$I(\mathbf{X}_k) = \max_{\mathbf{X}_{k-1}} [I(\mathbf{X}_{k-1})] + z_k(i, j), \quad (4)$$

$$\phi_k(\mathbf{X}_k) = \arg \max_{\mathbf{X}_k} [I(\mathbf{X}_k)]. \quad (5)$$

$\phi_k(\mathbf{X}_k)$ 用来记录各个阶段的最大化轨迹点。对所有序列图像递归计算,得到具有最大评价函数值的轨迹认为是目标轨迹,最后根据 $\phi_k(\mathbf{X}_k)$ 回溯各阶段轨迹点。对于多目标情况,可以通过预设虚警率计算评价函数阈值,大于阈值的轨迹认为是目标。

3 用于空间小目标检测的改进 DPA

由于相机与目标距离非常远,在较短时间内空间小目标在图像中的运动可以认为是匀速直线运动。根据相机和目标轨道参数,计算出目标在图像中运动速度约为 2 pixel/frame,满足 DPA 的基本前提。

3.1 递归方程的改进

在工程应用中,为了获得目标的亚像素坐标,通常对光学系统进行散焦处理,使大部分(例如 80%)目标能量集中于 2~5 pixel,因此原有算法的单点累积方法会丢失目标能量信息,而且对孤立噪声点非常敏感,容易产生虚警。为了增加目标能量累积效率,将式(4)的原递归方程修改为多点累积,同时增加方向控制权重以减少能量扩散:

$$I(\mathbf{X}_k) = \max_{\mathbf{X}_{k-1}} [I(\mathbf{X}_{k-1})] + \text{dir} \cdot \sum_R z_k(i, j), \quad (6)$$

其中, R 为多点累积区域, dir 为方向权重。如果直接进行多点累积,将会产生来自同一目标内不同点的多条高能量轨迹。由于目标灰度分布通常可以假定为二维高斯模型^[17],中心存在最大灰度点,因此累积区域设计为 $r \times r$ 范围内灰度小于中心像素的点,以保证同一目标只产生一条高能量轨迹:

$$R = \{i, j\} | i = i_0 - r, \dots, i_0 + r, \\ j = j_0 - r, \dots, j_0 + r, z_k(i, j) \leq z_k(i_0, j_0)\}, \quad (7)$$

其中 $z_k(i_0, j_0)$ 为中心点量测值。方向权重 dir 设

计为:

$$\text{dir} = \cos\left(\frac{\theta_{\text{pdt}} - \theta_0}{\alpha}\right), \quad (8)$$

其中 θ_{pdt} 表示前 k 阶段的历史平均速度方向; θ_0 为 k 阶段实际目标方向, α 为比例调节参数。

3.2 速度修正与轨迹数据结构

根据实际拍摄间隔,将每帧定义为一个阶段。在 TONISSEN 方法中,目标速度为常量不进行更新,因此需要对不同速度平面进行计算。为了在不降低算法性能的前提下减小计算量,设计在递归过程中对速度分量进行更新,从第二帧开始确定状态速度,构造历史平均速度分量为:

$$(\bar{u}_k, \bar{v}_k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (u_i, v_k). \quad (9)$$

假设目标速度恒定,但存在随机扰动,历史平均速度将逐渐逼近真实速度,目标状态方程也使用历史平均速度更新。原算法计算的状态个数为 $MNKR_m R_v$, 即图像长 \times 宽 \times 帧数 \times 目标机动范围 \times 速度范围,而修改后只需在第一帧考虑速度范围,因此计算的状态个数为 $MNR_m R_v + MNR_m (K-1)$, 是原来的 $(R_v + K-1)/(R_v K)$ 。当速度范围为 3, 帧数为 5 时,计算量大约只有原算法的一半。由此,轨迹数据结构设计为:

$$\{\text{PtrArray}(\mathbf{X}_k), I_k, \bar{u}_k, \bar{v}_k\}. \quad (10)$$

其中, \mathbf{X}_k 为目标状态向量, $\text{PtrArray}(\mathbf{X}_k)$ 表示轨迹点状态向量构成的指针数组。 I_k 为浮点型轨迹评价函数值。 (\bar{u}_k, \bar{v}_k) 表示轨迹前 k 阶段速度的历史平均值。

3.3 初始状态计算、阈值设置与轨迹合并

包括文献[7]在内,已知的文献对初始状态计算的描述都非常简略或未提及,这里设计为第二帧的每个像素建立一个状态,在目标运动速度和机动范围内,选择在第一帧的最大评价状态,为每个状态建立一条轨迹,根据每条轨迹在前两帧的两个状态建立轨迹初始速度,从第三帧开始递归计算。

DPA 计算完成后,评价函数值大于某阈值的轨迹认为是真实轨迹。这里阈值计算公式如下:

$$\text{Th}_t = kr^2 \mu_w + n \sqrt{kr} \sigma_w, \quad (11)$$

其中, k 为序列图像帧数, r 为多点累积正方形边长, n 为调解参数。由于算法中考虑了目标机动

范围,因此同一目标可能产生多条评价函数值较大的轨迹,这里以是否与最大评价函数轨迹具有多个相同轨迹点为依据,合并来自相同目标的多条轨迹。

4 算法性能分析

根据式(11)设定的评价函数阈值可以推算出算法是恒虚警的。假设最理想情况,噪声轨迹的方向权重 dir 全为 1, 并且所有累积区域内噪声像素都参与累积。由于帧差后小于 0 的像素值置为 0, 因此假定噪声近似服从正态分布 $N(\mu_w, \sigma_w^2)$ 且 IID, 噪声轨迹在 k 帧图像中的 $k \times r \times r$ 个像素和服从正态分布 $N(kr^2 \mu_w, kr^2 \sigma_w^2)$, 大于 Th_t 的概率(虚警率)可以通过查正态分布概率表得到, 当 $n=3$ 时虚警率为 0.998。这里的虚警率是完全虚警, 也就是轨迹完全是由噪声点构成的概率。再来考虑完全检测概率, 也就是轨迹的所有点都是真实点的概率。假设目标在图像上的弥散圆为 m 个像素, 每个目标像素灰度服从正态分布 $N(A_i, \sigma_w^2)$, $i=1, \dots, m$, 在 k 帧图像中 m 个目标像素和 $r^2 - m$ 个噪声像素灰度和近似服从 $N(k \sum_{i=1}^m A_i + k(r^2 - m) \mu_w, kr^2 \sigma_w^2)$, 因此评价函数大于 Th_t 的完全检测概率可以查表得到。根据上述分析, 某条轨迹有 k' ($k' < k$) 个真实点的概率分布近似服从 $N(k' \sum_{i=1}^m A_i + (kr^2 - k'm) \mu_w, kr^2 \sigma_w^2)$ 。更精确的检测概率与虚警率分析参见文献[9]。

5 实验结果

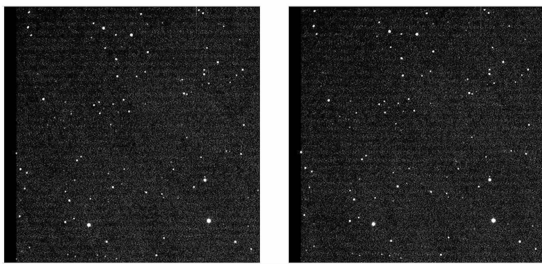
为了对比检验算法效果, 利用地基实摄空间小目标序列图像进行实验, 图像为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 其中有两个目标。在 CPU 为 P4 2.8 G、内存为 512 M 的兼容微型机上, 利用 VC6 对算法编程实现。首先利用恒星三角形定位方法^[18], 对原始序列图像配准, 然后经过相邻帧差分得到只包含目标和噪声的序列图像。再以 1 帧为 1 个阶段, 执行 DPA 递归, 最后合并相同目标产生的轨迹。这里算法参数如表 1:

表 1 算法参数设置

Tab.1 Algorithm parameters setting

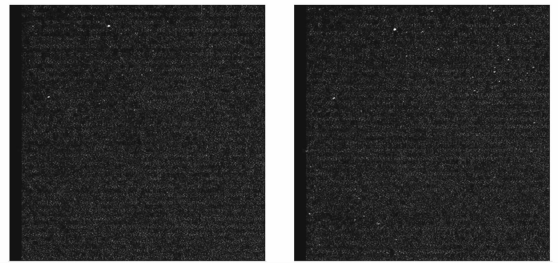
参数项	参数
多点累积面积	5 pixel×5 pixel
目标机动范围	7 pixel×7 pixel
目标速度上限	3 pixel
方向权重参数 α	1
阈值参数 n	3

实验结果如图 1,其中(a)为原始序列图像第 1 和第 4 帧,(b)为经过配准帧差后的序列图像第 1 和第 4 帧,(c)为第 2 和第 5 帧 DPA 检测结果,已经经过了轨迹合并处理,并标出了轨迹坐标。



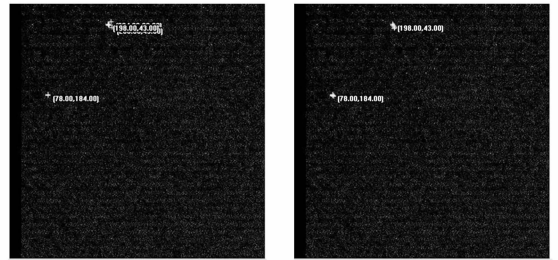
(a)原始序列图像 1、4 帧

(a) The 1st and 4th frames of origin image sequence



(b)原始图像相邻配准帧差后的序列图像 1、4 帧

(b)The 1st and 4th frames of image sequence after difference



(c)算法第 2、5 帧检测结果

(c) The 2nd and 5th frames of result image

图 1 算法实验图像及结果

Fig.1 Test images and results of algorithm

表 2 前 5 帧检测到目标轨迹

Tab.2 Track list of the first 5 frames

帧	轨迹
2	轨迹 146:->(468,198)->(466,199)得分:5 608.000 000;
	轨迹 2:->(462,206)->(466,200)得分:3 228.000 000;
	轨迹 39:->(327,78)->(326,78)得分:3 035.000 000;
	轨迹 66:->(473,204)->(467,200)得分:2 200.000 000;
3	轨迹 146:->(468,198)->(466,199)->(464,201)得分:8 103.966 374;
	轨迹 66:->(473,204)->(467,200)->(464,199)得分:4 656.999 670;
	轨迹 39:->(327,78)->(326,78)->(325,78)得分:4 580.999 625;
	轨迹 2:->(462,206)->(466,200)->(468,197)得分:3 445.994 685;
	轨迹 0:->(472,192)->(466,198)->(463,202)得分:3 193.932 392;
4	轨迹 146:->(468,198)->(466,199)->(464,201)->(461,202) 得分:10 831.942 400;
	轨迹 66:->(473,204)->(467,200)->(464,199)->(462,200) 得分:7 274.984 614;
	轨迹 39:->(327,78)->(326,78)->(325,78)->(325,80) 得分:5 984.975 924;
	轨迹 146:->(468,198)->(466,199)->(464,201)->(461,202) ->(460,201)得分:13 065.941 226;
5	轨迹 39:->(327,78)->(326,78)->(325,78)->(325,80)->(324,80) 得分:7 447.975 549;

表 2 是前 5 帧图像根据阈值得到的目标轨迹,可以看出算法从第二帧开始就已经找到目标,但是同一目标产生了多条轨迹,随着递归过程的进行,方向权重开始起作用,迅速抑制了虚假目标,到第 5 帧时已经排出了虚警,检测出真实目标。注意由于 BMP 图像存储是从下到上从左到右的,因此图 1 的横坐标为表 2 中纵坐标数据,图 1 的纵坐标为图像高度减表 2 横坐标。对比图 2 中的单点能量累积方法,由于图中孤立高亮点较多,导致虚警点较多,该图为同样的序列图像采用单点能量累积方法将阈值设置为 $T_{ht} = k\mu_w + 8k\sigma_w$ 时,递归到第 5 帧和第 10 帧的结果,分别检测出 47 和 30 条轨迹。图 3 为单点法和多点法在递归到第 5 帧时,评价价值最大的 20 条轨迹对比图,左图为单点法,右图为多点法。图中最左侧的两条线柱为真实目标评价价值,其余为虚假轨迹,从图中可以看出多点累积方法的目标评价价值与虚假

轨迹差别更大。以目标轨迹评价价值为信号,虚假轨迹评价价值为噪声,则可计算评价价值信噪比 $SNR_{scr} = \bar{I}_s / \bar{I}_n$,多点法为 2.93 比单点法的 2.06 大 42%,说明多点法能够更有效地累积目标能量。

表 3 不同累积方式和不同速度计算方式下的耗时
Tab. 3 Consuming time under different accumulations and different velocity calculations

算法	6 帧耗时/s
单点累积,速度历史更新	47.2
多点累积,速度历史更新	144.5
单点累积,多速度平面	246.8
多点累积,多速度平面	327.8

为了验证算法中速度更新机制能否减少计算量,还利用相同序列图像对不同算法进行计算,耗时对比如表 3。从表中可以看出,不论是单点累积还是多点累积,速度更新模式的耗时都比多速度平面计算模式耗时少。虽然本文的多点累积法使计算量增加,但是修改为速度更新模式后耗时为 144.5 s,比原算法单点累积加多速度平面计算模式还少 102.3 s。

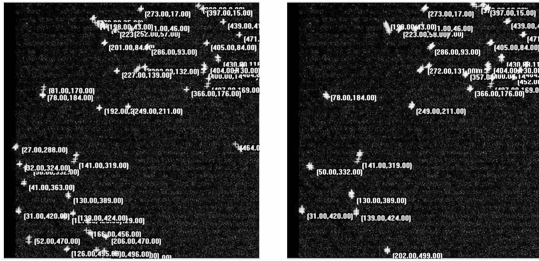


图 2 单点能量累积方法第 5、10 帧时检测结果

Fig. 2 Results of the first 5 frames and the first 10 frames detected by original algorithm

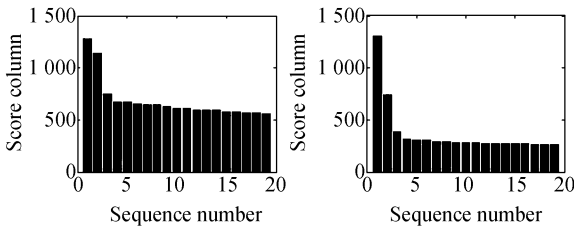


图 3 单点法和多点法第 5 帧时最大的 20 条轨迹值对比
Fig. 3 Score columns of 20 tracks with maximum score detected in the fifth frames by original algorithm and multi-point accumulation algorithms, respectively

6 结 论

本文提出了一种多点能量累积的 DPA,与原始的单点累积方法相比,能够更有效地检测由于散焦产生的多点小目标,更重要的是多点能量累积可以有效减少孤立噪声点产生的虚警。实验结果显示,利用相同倍数的标准差为阈值时,本文的多点累积方法 5 帧即可无虚警地检测出目标,而原始的单点累积方法在第 10 帧仍存在大量虚警。从评价价值的信噪比来看,多点法也比单点法大 0.87(42%)。本文还对原算法的多个速度平面递归计算进行了简化,降低了计算复杂度一半以上。下一步的工作是研究如何有效检测中途入场、出场的小目标。

参考文献:

[1] 陈浩,谭久彬. 一种用于光电目标跟踪的非线性滤

波算法[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 917-921.
CHEN H, TAN J B. Nonlinear filtering algorithm for improving opto-electric target tracking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 917-921. (in

- Chinese)
- [2] 孟勃,朱明. 粒子滤波算法在非线性目标跟踪系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1421-1426.
MENG B, ZHU M. Nonlinear object tracking using particle filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1421-1426. (in Chinese)
- [3] 王广平,许廷发,倪国强,等. 多 ADSP-TS201 红外弱小目标实时检测跟踪系统的硬件设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 941-944.
WANG G P, XU T F, NI G Q, *et al.*. Hardware design of infrared dim target real time detection and tracking system based on multiple ADSP-TS201S [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 941-944. (in Chinese)
- [4] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, 21(1): 144-156.
- [5] BARNIV Y, KELLA O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets PART II: Analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(6): 776-788.
- [6] JAMES A, SCOTT S, HENRY P. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(1): 44-56.
- [7] TONISSEN S M, EVANS R J. Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(4): 1440-1451.
- [8] JOHNSTON L A, KRISHNAMURTHY V. Performance analysis of a track before detect dynamic programming algorithm [C]. *Silver Anniversary IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Istanbul*, 2000: 49-52.
- [9] JOHNSTON L A, KRISHNAMURTHY V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 228-242.
- [10] 赵宇明,李介谷. 序列图像(亚)像素级点目标检测的 DP 算法[J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(6): 145-151.
ZHAO M Y, LI J G. Point target detection and tracking in sequential images using dynamic programming [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1995, 29(6): 145-151. (in Chinese)
- [11] 李士民,郭立,朱俊林. 复杂背景下弱小点目标的检测算法[J]. 电路与系统学报, 2002, 7(4): 26-30.
LI SH M, GUO L, ZHU J ZH. Detection algorithm of weak point targets under complicated background [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2002, 7(4): 26-30. (in Chinese)
- [12] 陈尚锋,陈华明,卢焕章. 基于加权动态规划和航迹关联的小目标检测技术[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(2): 46-50.
CHEN SH F, CHEN H M, LU H ZH. Detection and tracking of dim targets based on dynamic programming and track matching[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2003, 25(2): 46-50. (in Chinese)
- [13] 陈华明,孙广富,卢焕章,等. 基于动态规划和置信度检验的小目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 472-476.
CHEN H M, SUN G F, LU H ZH, *et al.*. A detection algorithm for small moving targets based on dynamic programming and confidence test [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(4): 472-476. (in Chinese)
- [14] 强勇,焦李成,保铮. 动态规划算法进行弱目标检测的机理研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(6): 721-727.
QIANG Y, JIAO L CH, BAO ZH. Study on mechanism of dynamic programming algorithm for dim target detection [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(6): 721-727. (in Chinese)
- [15] 张兵,卢焕章. 动态规划算法在运动点目标检测中的应用研究[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(12): 1895-1900.
ZHANG B, LU H ZH. Dynamic programming algorithm for detecting moving point targets [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, 26(12): 1895-1900. (in Chinese)
- [16] 谭晓宇,陈谋,姜长生. 改进动态规划算法在小目标检测中的应用[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 23-27, 84.
TAN X Y, CHEN M, JIANG CH SH. Applications of improved dynamic programming algorithm in small target detection [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2008, 35(5): 23-27, 84. (in Chinese)
- [17] DEKEL B Z, ISRAELIAN S, GARBER M, *et*

al. . Three axis star tracker[C]. *8th Meeting on Optical Engineering in Israel, SPIE*, 1992, 1971:203-211.

- [18] 王春歆, 沈同圣, 张玉叶. 基于层次聚类的弱小目标检测算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(19):

24-27.

WANG CH X, SHEN T SH, ZHANG Y Y. Small targets detection based on hierarchical clustering[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(19):24-27. (in Chinese)

作者简介:



王春歆(1979—),男,吉林人,博士研究生,2000年、2005年于海军航空工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、小目标检测等方面的研究。E-mail: nsfcityhunter@sina.com



张玉叶(1980—),女,山东日照人,博士研究生,2002年于烟台师范学院获得学士学位,2005年于海军航空工程学院获得硕士学位,主要从事图像处理、图像复原等方面的研究。E-mail: amigo_yezi@sohu.com

王学伟(1972—),男,山东青州人,副教授,博士,硕士生导师,1992年、1999年于海军航空工程学院分别获得学士、硕士学位,2005年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事图像处理、光电制导性能评估的研究。E-mail: xueweiwang@sohu.com

徐景硕(1965—),男,山东日照人,教授,博士生导师,1986年、1989年、2005年分别于西北工业大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事惯性技术、信号处理等方面研究。E-mail: xujs1965@163.com

● 下期预告

超声锁相热像技术检测接触界面类型缺陷

刘 慧,刘俊岩,王 扬

(哈尔滨工业大学 机电工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

为了提高超声锁相热像技术(ULT)的检测效率并获得最佳检测结果,对超声波调制、热图序列处理和检测参数选择进行了研究。阐述了超声锁相热像技术的检测原理并进行了理论分析;建立了ULT的检测系统,采用幅值方波调制的超声波对试件进行激励,同时用红外热像仪记录试件表面热图,在瞬态对其锁相处理得到相位图和幅值图,利用幅值图和相位图实现对缺陷的检测。研究了该方法对钢板表面及近表面的微裂纹(微米级)和铝合金板内不同深度缺陷等接触界面类型缺陷的检测。结果表明:对A3钢板材料表面(近表面)裂纹的检测,调制频率选择0.5 Hz,接触压力仅需保证激励试件时激励头与试件接触不脱离,约0.25 kN,激励头与微裂纹的距离对检测结果几乎无影响,激励位置可根据试件结构而确定;降低调制频率可提高缺陷的检测深度,对于铝合金材料,调制频率 ≤ 0.3 Hz能够探测到4 mm深度的缺陷;该方法能够准确检测蜂窝夹层结构的脱粘缺陷。研制的超声激励装置组成的检测系统在数秒内即可完成对接触界面类型缺陷的准确检测。