

基于动态规划的红外运动小目标检测算法

黄林梅, 张桂林, 王新余

(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:针对低信噪比下红外小目标的特点,提出一种改进的实用动态规划算法,通过适当的预处理抑制背景噪声、多帧图像灰度累加以提高信噪比,并由虚警和检测概率确定分割门限,检测出小目标位置及状态。详细地叙述动态规划的计算过程及分割门限的确定方法,以简单的步骤实现对低信噪比小目标的检测。实践证明,改进的动态规划算法不仅能完成检测的任务,而且并行性好,易于硬件实现,为下一步的目标跟踪打下了良好的基础。

关键词:动态规划; 低信噪比; 红外图像; 小目标

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)03-0303-04

Detecting of small infrared moving object based on dynamic programming algorithm

HUANG Lin-mei, ZHANG Gui-lin, WANG Xin-yu

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

Abstract: An update dynamic programming algorithm is presented in allusion to the features of small moving object. Using the sum of grey level in image sequences, the target is brought into prominence and noise is suppressed by the image preprocessing at the same time. The probability of detecting and false alarm are used to determine the threshold of image, which can abstract the small target accurately. And dynamic programming algorithm performs well in detecting, and it lays foundations for the tracking in the next step.

Key words: Dynamic programming; Low signal to noise rate; Infrared Image; Small target

0 引言

红外图像小目标检测是精确制导武器的关键技术之一。在现代高技术战争中,要求武器系统具备极

快的反应速度,在很远的距离能及时地发现、跟踪、捕获和锁定目标的能力,因此,对目标检测系统提出了更高的要求。这使得小目标的检测更加困难,主要技术难点有:

(1) 由于小目标无形状、尺寸等信息,可供检测

收稿日期:2003-08-01; 修订日期:2003-10-12

作者简介:黄林梅(1979-),女,重庆人,硕士,主要从事数字图像处理、景象匹配、红外图像的获取及实时目标检测与跟踪方法研究。

算法利用的信息很少；

(2) 在低信噪比情况下,目标极易被噪声淹没,单帧图像处理不能实现对目标的可靠检测,必须对图像序列进行处理,因而需要存储和处理的数据量大。

(3) 由于目标与成像之间存在相对运动,目标图像在视场中出现的位置和运动状态发生变化,逐帧累积信号能量时,可能的轨迹分支数目过多,造成信息处理量增加。

在解决复杂背景、低信噪比环境下红外小目标检测的方法之一是先跟踪后检测(TBD)^[1],利用图像的空间和时间信息,在三维图像中对较多的可能轨迹进行跟踪,起初并没对这些轨迹是否代表真实的目标作出判定,而是计算每条跟踪轨迹的后验概率函数。如果某条轨迹的后验概率函数值超过规定门限,则认为这条轨迹代表一个目标。用于小目标检测的动态规划就是基于先跟踪后检测的思路,将多帧灰度累加后再作判断,检测出目标位置,通过回溯可以得到整个过程中的目标轨迹。文中提出的改进动态规划方法不仅简化了搜索累加过程,而且略去了回溯过程,改为并行处理。实践证明,该方法在保证虚警和检测概率的同时大大减少了动态规划的计算量和存储量,提高了运算速度。

1 理想目标背景模型

设红外图像的大小为 $M \times M$,子序列长度为 N 。若用 X_i 表示第 i 帧图像 g_i 上像素点坐标,则理想目标背景图像模型^[2]为:

(1) 噪声灰度呈高斯分布

$$n(X_i) \sim N(0, \sigma^2) \quad \forall X_i$$

式中 σ^2 为背景方差。

(2) 实际获取图像满足噪声和目标叠加原理

$$g(X_i) = n(X_i) + T(X_i) \quad \forall X_i$$

式中 $T(X_i) = \begin{cases} A & \text{如果 } X_i \in \text{target} \\ 0 & \text{如果 } X_i \notin \text{target} \end{cases}$, A 为目标灰度。

待检测的点目标具有如下运动特征:

- (1) 出现的时间与位置具有任意性;
- (2) 运动轨迹具有任意性;

(3) 运动速度 v 具有未知性,但视为匀速运动。

2 动态规划算法

2.1 动态规划基本原理

动态规划用于小目标检测主要基于以下原理:

(1) 沿着目标运动轨迹进行累积,所得能量必然最大^[3]。

设 X_i 为第 i 帧图像 g_i 上的任意像素点,对序列 $(X_N, X_{N-1}, \dots, X_1)$ 构成的任意轨迹定义累计能量函数:

$$E(X_N, X_{N-1}, \dots, X_1) = E_N(X_N, X_{N-1}) + E_{N-1}(X_{N-1}, X_{N-2}) + \dots + E_1(X_2, X_1) \quad (1)$$

则目标轨迹 $(T_N, T_{N-1}, \dots, T_1)$ 对应于:

$$E(T_N, T_{N-1}, \dots, T_1) = \max\{E_N(X_N, X_{N-1}) + E_{N-1}(X_{N-1}, X_{N-2}) + \dots + E_1(X_2, X_1)\} \quad (2)$$

上述公式可以用穷举法实现,但是对于 $M \times M \times N$ 的图像,其计算量正比于 M^{2N} 。计算量随观测数据呈指数级增长,必须寻找一种功效相同但计算量小的行之有效的方法来代替,在工程上才有应用价值,而动态规划就是代替穷举法的最好方法。

(2) 动态规划最优化原理

作为整个过程最优化策略,无论过去的状态和决策如何,余下的决策必须构成最优化策略^[4]。对于目标轨迹,则满足:

$$E(T_N, T_{N-1}, \dots, T_1) = \max_{X_N} \{E_N(X_N) + \max_{X_{N-1}} \{E_{N-1}(X_N, X_{N-1}) + \max_{X_{N-2}} \{E_{N-2}(X_{N-1}, X_{N-2}) + \dots + \max_{X_1} \{E_1(X_2, X_1)\}\}\}\} \quad (3)$$

由公式(3)得出动态规划,将一个 N 阶段决策过程化为一组 N 个单阶段决策过程,这样可以大大减少计算量,总计算量正比于 $M^2 N$,与穷举法相比减少的倍数为 $M^{2N} / M^2 N = M^{2(N-1)} / N$ 。对典型的问题规模(如 $M = 256, N = 10$),此倍数超过一个数量级。

2.2 状态转移

状态转移在动态规划算法中占有很重要的位置,直接影响到动态规划计算量的大小。所谓状态转移是指目标点经过一定的时间延迟,下一帧可能出现的

位置及状态^[5],这些位置区域是以目标当前位置为中心,由目标运动速度的大小、抖动及其他因素影响形成的环形区域,如图 1 所示的灰色地带。假设目标当前的位置为 (i, j) ,运动的速度为 $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$,经过时间 t ,状态转移间距为 $(r_{\max} - r_{\min})$ 环形区域中。其中 $r_{\min} = v_{\min} t, r_{\max} = v_{\max} t, t$ 为相邻两帧图像间的时间间隔。

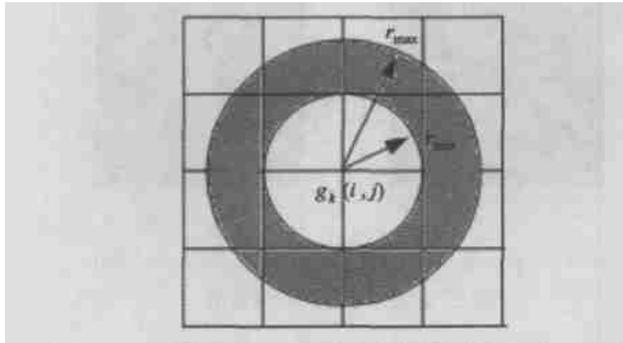


图 1 状态转移
Fig. 1 State transition

常用 q 表示状态转移的区域大小,如 $q = 9$,表示下一帧状态转移到以当前位置为中心点的 3×3 邻域,共有 9 个像素点; q 的大小正比于速度 v 。

假设目标运动的速度未知但较大,帧与帧之间的位移随之增加,要在一个大的状态转移区中搜索目标,运算量和存储量会呈指数级增长,若此区域增加到图像整个范围,动态规划不会达到减少计算量的目的。因此,可以得出结论:动态规划适合于运动速度在一定范围内的目标检测。

2.3 DP 简化算法步骤

基于上述的状态转移特性,设 X_k 代表图像第 k 帧所有目标可能的像素点, $X_k = [i, j], X_{k+1}$ 是该像素点在 $k + 1$ 帧的可能位置上的像素, X_{k-1} 是可能转移到 X_k 状态的所有像素,即: $X_{k-1} = PRE(X_k), X_{k+1} = POST(X_k)$, 动态规划具体实现步骤简化为:

$$(1) k = 1$$

$$h_1(X_2) = \max_{X_1 \in PRE(X_2)} \{g(X_1)\} \quad (4)$$

$$(2) 2 \leq k \leq N$$

$$h_{k-1}(X_k) = \max_{X_{k-1} \in PRE(X_k)} \{h_{k-2}(X_{k-1}) + g(X_{k-1})\} \quad (5)$$

$$(3) k = N$$

$$T_N \text{ 满足 } h_N = \{g_N(X_N) + h_{N-1}(X_N)\} \quad V_T \quad (6)$$

2.4 检测门限 V_T 的确定

由于红外图像近似于高斯分布,而且帧与帧之间为独立同分布^[6],因此,

$$S(X_N) \sim N(\mu_N, \frac{\sigma^2}{N}) \sim N(Nm + nA, (\sqrt{N})^2) \quad (7)$$

式中 n 表示累加的点目标个数。当 $n = N$ 时,可取阈值为:

$$V_T = Nm + NA - \sqrt{N} \quad (8)$$

式中 m 为待定常数; $m = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M g(i, j)$; $\sigma^2 = \frac{1}{M^2 - 1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [g(i, j) - m]^2$; $A = SNR$, 其中 SNR 为图像信噪比。按上式选取门限,可得 P_D 为:

$$P_D = P(Z > V_T), Z \sim N((Nm + Na), (\sqrt{N})^2) \quad (9)$$

将公式(8) 带入公式(9) 得到检测概率和虚警概率为:

$$P_D = P(Z > -), Z \sim N(0, 1) \quad (10)$$

$$P_{FA} = Pr(\max_{X_N} h(X_N) > V_T) \quad (11)$$

由上述分析可知,在检测概率和虚警概率一定的情况下(检测概率 99%,虚警概率 10^{-6}), SNR 越低,DP 算法需要处理图像的帧数越多。

2.5 流水线处理

作为并行处理的一种,流水线处理得到广泛的应用。利用流水线处理的思路,将其应用于动态规划序列图像的小目标检测,其定义如下:

定义 1 流水线 由 N 帧图像组成的一个先进先出(FIFO)队列和一个二维处理单元(PE)构成,阵列尺寸与图像大小相同。

定义 2 流水线更新 在每个帧周期,从 FIFO 的底部删除一帧图像而在其顶部加入一帧图像的过程。

基于动态规划红外小目标的流水线检测算法为:

- (1) 构造一个 N 帧图像序列的流水线管道,以及 N 空白的目标帧,一般 $N = 10$;
- (2) 用动态规划方法处理该管道中的 N 幅图像,累加后的分割结果保存在空白帧中;
- (3) 流水线更新,加入一帧新图像,重复(2),这

样就可以得到一系列动态规划处理结果,根据运动的连续性,确定目标位置。

应用流水线处理方法,可以放宽对分割门限的要求,分割剩下的虚警点可在此步中进一步去掉,只有在后续帧中状态转移范围内都出现的点才是目标。

3 实验及结果

3.1 图像预处理

采用红外弱小目标的图像序列作为原始图像,其信噪比小于3,在实际红外场景中,背景杂波将小目标淹没,且分布并不服从理想目标背景模型,若直接用动态规划进行处理,结果会产生大量的虚警点。因此,在使用动态规划方法之前,必须进行适当的预处理。由于红外小目标在图像信号中属于高频成分,需要采用高频性质的滤波才能保留小目标。实验中选取预处理方法的步骤为:

(1) 用全一的平滑模板对原始图像进行低速滤波,提取图像中的低频成分;

(2) 原始图像减去上述平滑结果,可得到图像中的高频成分,目标就在其中。

预处理后,图像中的背景得到了最大限度的抑制,剩下的是背景中含有的少量高频信号和小目标,如图3(b)所示。

3.2 仿真实验

(1) 采用合成图像验证动态规划算法

实验图像的大小为 256×256 ,背景是均值为127、方差为10的高斯分布 $N(127, 10)$,图像的信噪比为2.5,目标大小为5个像素的合成图像。图像分布完全符合理想目标模型,因此,不需要进行预处理。目标的第一帧位置为(90,55),运动速度 $v = 1$ 像素/帧,第10帧目标的位置为(80,55),见图2(a)、(b);图2(b)为10帧原始图像按照动态规划方法累加后的结果图像,经过累加后,隐藏着的小目标渐渐突出,即图像信噪比提高了,便于下一步的分割;图2(c)为累加图像用 V_T 分割后的图像,其中亮点为目标在第10帧中的位置(80,55),分割后的图像去除了所有干扰,其结果可为小目标跟踪提供很好的基础;图2(d)为20帧图像流水线处理结果,从10帧以后,每一帧目标位置形成的轨迹如白线所示,该结果准确反映了目标的

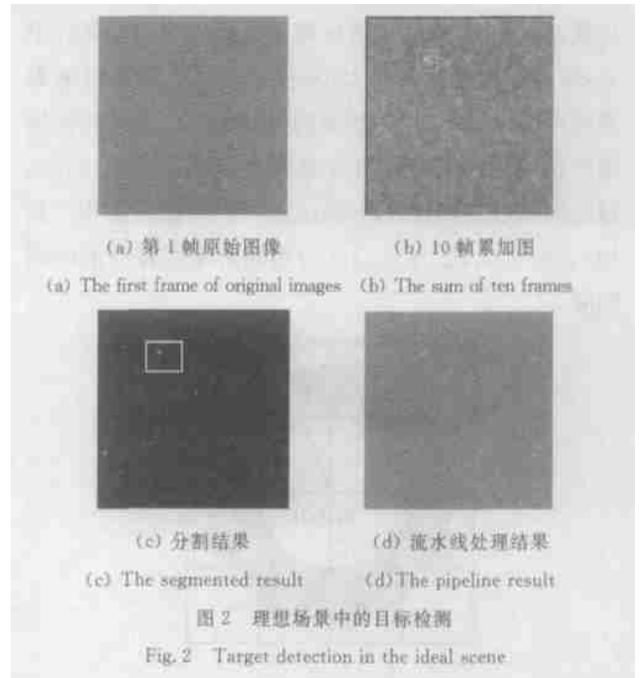


图2 理想场景中的目标检测

Fig. 2 Target detection in the ideal scene

轨迹。

(2) 自然红外场景下动态规划检测小目标

实验序列图为天空背景下的红外图像,大小为 150×140 ,目标运动速度 1 像素/帧,信噪比 $SNR = 1.8$,目标小于5个像素,如图3所示(流水线结果略)。图3(b)是高通滤波结果,如果由此直接分割,将会产生很多虚警点,因此不能在此作出判断;图3(c)

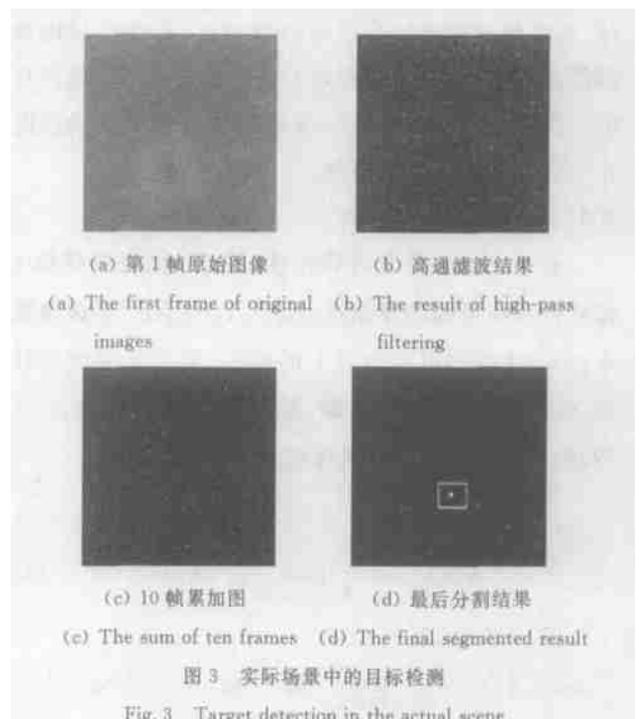


图3 实际场景中的目标检测

Fig. 3 Target detection in the actual scene

(下转第319页)

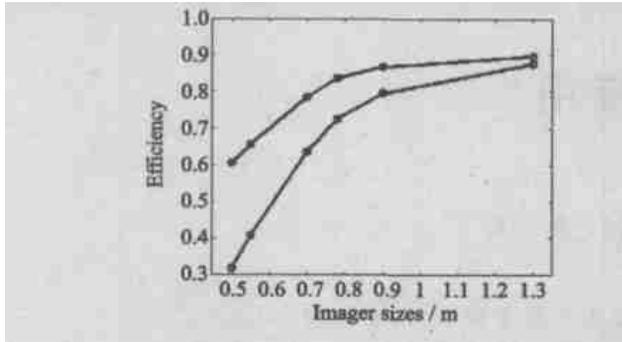


图6 光收集效率与空间光调制器尺寸关系曲线

Fig. 6 Relation curves of collection efficiency and panel sizes

3 cm 的面板。同时这种改进的系统在其他条件相同的情况下照明更加均匀,使系统向着高效率、高均匀性、小的光学扩展量的方向发展,解决了光调制器件由于尺寸减小给照明系统设计带来的问题。但是椭球双曲二次成像型方棒照明系统的缺点是结构较复杂,满足实用性要求、降低工艺难度和价格是下一步要解决的主要问题。

参考文献:

- [1] Benjamin A Jacobson, Robert D Gengelbach. Beam shape transforming devices in high-efficiency projection systems [A]. SPIE [C]. 1997, 3139: 141-150.
- [2] 张增宝,翁志成,丛小杰,等. 液晶背投影电视中蝇眼透镜阵列照明系统的设计[J]. 光学精密工程, 2002, 10: 126-129.
- [3] Benjamin A Jacobson, Robert D Gengelbach et al. Metal halide lighting systems and optics for high efficiency compact LCD projectors [A]. SPIE [C]. 1998, 3296: 33-40.
- [4] Optical Research Associates. LightTools Illumination Module User's Guide [M]. 1997.
- [5] Jin-Chou Yoo, Chien-Ping Kung, et al. Compact projection optical engine [A]. SPIE [C]. 1998, 3296: 46.
- [6] Leon Shapiro, New ANSI/IEC standard for projectors [A]. SPIE [C]. 1996, 2650: 209.
- [7] Iwai J I. Illumination system using Rod-Type integrator [J]. SID, 1998, 721.

(上接第 306 页)

为红外图像序列经过 10 帧累加后的结果,累加后灰度最高的位置就是目标对应的位置。图 3(d) 为使用门限分割结果,准确地检测出小目标的位置。

4 实验分析及结论

实验结果表明,提出的动态规化算法在规定的虚警和检测概率下,不但能解决以背景为标准的高斯噪声,信噪比小于 3 的复杂图像中小目标检测的问题,而且也能准确检测出复杂背景下红外图像中的小目标。动态规化算法是穷举法的一种替代,它不仅减少了计算量,而且鲁棒性、并行性好,易于硬件实现,是低信噪比条件下小目标检测的可行方法。

参考文献:

- [1] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detection dim moving

- targets [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21 (1): 144-156.
- [2] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detection algorithm [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 228-242.
- [3] Tarun Soni, Walter H Ku. Performance evaluation of 2-D adaptive prediction filter for detection of small objects in image data [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1993, 2(3): 327-339.
- [4] James Arnold, Scott Shaw. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 44-56.
- [5] Reed I, Gagliardi R, Atotts L. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(3): 434-440.
- [6] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detection dim moving targets part II: analysis [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-23(6): 776-778.