

红外运动弱小目标的动态规划检测

王 博, 张建奇

(西安电子科技大学技术物理学院 西安 710071)

【摘要】针对动态规划方法在对红外序列图像运动弱小目标进行检测时的能量扩散问题,提出了一种新的检测方法。该方法以目标的运动特性为基础,构造出一个高斯模板来描述目标在下一帧可能出现的位置,利用概率来描述目标可能的运动而不是直接的硬约束,能很好地克服目标运动的随机性。将该方法应用于实际的红外序列图像的运动弱小目标检测,实验结果表明,可以大幅降低动态规划方法的能量扩散问题。

关键词 检测; 动态规划; 高斯分布; 目标

中图分类号 TN219

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.032

Dynamic Programming Approach to Small Moving Target Detection in Infrared Image Sequences

WANG Bo and ZHANG Jian-qi

(School of Technical Physics, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract A new small moving target detection algorithm in infrared image sequences is presented to reduce the energy scattering in dynamic programming-based algorithm. Based on the property of target motion, a Gaussian template is built to model target position in the next frame. Our algorithm uses probability not hard constrain, so it can overcome the randomness of target motion. Experiments with real infrared image sequences show our algorithm can greatly reduce the energy scattering in dynamic programming-based algorithm.

Key words detectors; dynamic programming; Gaussian distribution; targets

运动弱小目标的检测与跟踪^[1]是红外导引头的关键技术之一,是提高红外导引头作用距离的重要方面。当目标距离较远时,在探测器上所成的像仅占一个或少数几个像素,目标的辐射能量低,分布信息和结构信息缺乏,检测困难,可利用目标的运动信息进行目标检测^[2]。在这种背景下产生了先跟踪后检测的目标检测方法,该类方法并不直接对各帧的数据进行目标检测,通过跟踪一段时间数据,待目标能量累积到一定程度时再对目标进行检测。因此,如何跟踪目标的运动轨迹并对目标信号沿着轨迹进行累积,成为该类方法研究的重点。其中较为优越的是基于动态规划的运动弱小目标检测方法,它利用动态规划分段优化的思想,将目标轨迹的搜索问题转化为分级优化,具有坚实的数学基础,在国内外引起了广泛关注。但该方法在对目标能量进行累积时存在能量扩散效应,影响检测结果^[3-4]。文献[5]对该方法进行了进一步的改进。文献[6]给出

一种基于方向加权的动态规划方法,对目标的可能运动方向进行约束,降低了能量扩散。文献[7]假设目标沿直线运动,采用最小二乘方法给出目标下一帧中可能出现的位置。文献[8]以目标状态的稳定性和运动方向的连续性为基础,对目标运动进行约束。文献[9]采用概率的思想来描述目标上一帧中可能出现的位置。结合以上方法的优缺点,本文提出一种新的基于动态规划的运动弱小目标检测方法。该方法以目标的运动特性为基础,构造出一个概率模板来描述目标在下一帧可能出现的位置。由于该方法利用概率来描述目标的运动而不是直接硬性的约束,克服了目标运动的随机性。

1 动态规划方法的基本原理^[6]

红外序列图像中运动弱小目标的强度很弱,很难在单帧中直接进行检测,有效的方法是对目标信号进行累积。由于目标能量在不同帧之间是相关的,

收稿日期: 2009-01-27; 修回日期: 2009-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(60777042)

作者简介: 王 博(1980-), 男, 博士生, 主要从事光电图像处理、目标检测等方面的研究。

而噪声在不同帧之间是不相关的,因而沿目标轨迹上的能量累积将远大于非目标轨迹上的能量累积。寻找序列中能量累计强度最大的点,便可实现运动弱小目标的检测。这一过程可以用动态规划方法来实现,即将目标轨迹搜索问题转化为分级优化,具有很高的执行效率。

设 $n(i, j, k)$ 为高斯噪声,有 $n(i, j, k) \sim N(0, \sigma^2)$ 。其中, i, j 为空间坐标, k 为帧序号,其分布在时间和空间均独立。目标信号为:

$$s(i, j, k) = \begin{cases} S & \text{目标存在} \\ 0 & \text{目标不存在} \end{cases} \quad (1)$$

式中 S 为目标强度。

对于白化以后的红外序列图像,其中的任意像素点 $I(i, j, k)$ 可形成如下两种假设:

$$\begin{cases} H_1: I(i, j, k) = s(i, j, k) + n(i, j, k) & \text{目标存在} \\ H_0: I(i, j, k) = n(i, j, k) & \text{目标不存在} \end{cases} \quad (2)$$

定义 N 帧图像序列中的一条轨迹为:

$$T(K) = \{t_k | k = 1, 2, \dots, K\} \quad (3)$$

式中 t_k 为轨迹上的点。

若 $T(K)$ 为目标轨迹,则轨迹上像素点的灰度概率分布为:

$$P_{H_1}[T(K)] = A \prod_{k=1}^K \exp\left\{-\frac{[I(i, j, k) - S]^2}{\sigma^2}\right\} \quad (4)$$

式中 A 为归一化系数。

若 $T(K)$ 为非目标轨迹,则有:

$$P_{H_0}[T(K)] = A \prod_{k=1}^K \exp\left[-\frac{I^2(i, j, k)}{\sigma^2}\right] \quad (5)$$

由此,红外序列图像中任意一条轨迹的目标似然比为:

$$L[P(K)] = \frac{P_{H_1}(T_K)}{P_{H_0}(T_K)} = \prod_{k=1}^K \exp\left[\frac{2I(i, j, k)S - S^2}{\sigma^2}\right] = \exp\left[\frac{2S}{\sigma^2} \sum_{k=1}^K I(i, j, k) - \frac{KS^2}{\sigma^2}\right] \quad (6)$$

由N-P准则可知,当序列中有目标时,似然比函数 $L[P(K)]$ 取最大值的轨迹为目标轨迹,因此,寻找 $L[P(K)]$ 的最大值即可实现目标轨迹的检测。由式(7)可知,求 $L[P(K)]$ 的最大值等同于求 $\sum_{k=1}^K I(i, j, k)$ 的最大值。记到达第 k 帧点 (i, j) 的所有轨迹中能量最大轨迹的累加和为 $E_{\max}(i, j, k)$, 求解过程可写成递推形式为:

$$\begin{cases} E_{\max}(i, j, k) = \max_{0 < m, n \leq N} E_{\max}(m, n, k-1) + I(i, j, k) \\ E_{\max}(i, j, 0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

即第 k 帧图像中经过点 (i, j) 的能量最大轨迹等于前 $k-1$ 帧图像中能量最大轨迹加上第 k 帧图像中点 (i, j) 灰度值。以此类推此,直到第一帧图像。在相邻帧内目标的运动范围不会超过最大速度,则有:

$$\begin{cases} E_{\max}(i, j, k) = \max_{0 < m, n \leq D_{k-1}} E_{\max}(m, n, k-1) + I(i, j, k) \\ E_{\max}(i, j, 0) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 D_{k-1} 为邻帧目标的最大运动范围的集合; $0 < m, n \leq K$ 表示在整幅图像范围内。由此实现基于动态规划方法的红外序列图像运动弱小目标检测。

2 改进的动态规划方法

由以上分析可知,动态规划方法在对目标能量进行累加时仅仅考虑目标的最大速度,在这种情况下很容易出现能量扩散问题。考察目标在序列图像中的运动可知,由于目标自身的惯性,目标的运动在相邻两帧中变化很小,具有极大的相关性,因此可利用目标的运动特性来约束目标能量的累加。由目标的运动特性可知,目标在当前帧中的位置,仅可能是前一帧中目标所处位置的周围。依据目标在前一帧中信息并进一步添加目标本身的运动信息,可以降低动态规划方法在累计目标能量时的能量扩散。本文在对目标进行约束时不仅考虑目标的最大速度,还考虑目标的运动方向和路径。

在对目标运动进行约束之前需要先确定出目标的运动方向。对于当前帧中的任意像素点,如果有目标划过,由目标运动的帧间相关性可得,前一帧中相同像素点的周围一定含有目标。对于白化以后的红外图像,目标往往在其周围的一个很小范围内具有最大的亮度,因此,考察前一帧中对应像素点周围的最亮像素点即可确定目标的运动方向。

对于帧间运动不超过2个像素的目标,可用 5×5 的模板来约束目标的运动,本文的目标运动均不超过每帧2个像素,对于帧间运动更大的目标只需对模板进行相应的扩展即可。

7	6	6	6	5
0	7	6	5	4
0	0	8	4	4
0	1	2	3	4
1	2	2	2	3

图1 目标位置的方向定义

定义9个方向表示目标在前一帧中所处的位置相对于当前位置的方向,如图1所示。方向8表示目标在连续两帧中没有移动位置。取5×5大小的模板在前一帧图像遍历,寻找当前帧中像素点对应的前一帧中最大像素点的位置为:

$$[x(i, j, k), y(i, j, k)] = \arg \max_{m, n} [I(i + m, j + n, k)] \quad (9)$$

式中 $m, n = -2, -1, 0, 1, 2$ 。则前一帧中目标像素点所处的方向为:

$$\text{direction}(i, j, k) = DT[x(i, j, k), y(i, j, k)] \quad (10)$$

式中 $DT[x(i, j, k), y(i, j, k)]$ 对应于图1中的方向。

对于红外序列图像中的点目标,其空间强度分布为:

$$S(i, j) = \gamma e^{-1/2 \left(\left(\frac{i - i_0}{\sigma_i} \right)^2 + \left(\frac{j - j_0}{\sigma_j} \right)^2 \right)} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,点目标的强度分布可以用高斯函数来描述。本文采用高斯模板来描述序列图像中点目标可能的运动情况,对应于图1的目标方向,定义如图2所示的滤波模板,每个模板中的3×3子模板都为高斯模板。

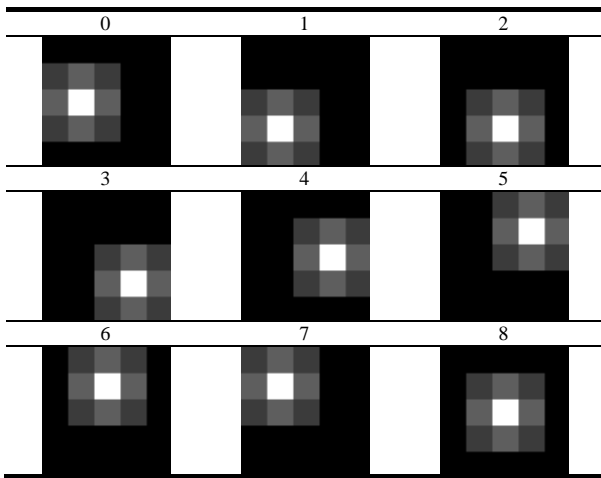


图2 不同方向的滤波模板

因此,当前帧中的每一个像素点可由式(10)给出目标方向,取该方向对应的图2中的滤波模板对前一帧的能量累积结果进行滤波,即有:

$$C_f(i + m, j + n, k) = \quad (12)$$

$$C(i + m, j + n, k) \text{Tem}_{\text{direction}}(m + 2, n + 2)$$

式中 $\text{Tem}_{\text{direction}}(m + 2, n + 2)$ 即为图2中滤波模板中相应位置对应的值。

当前帧中目标能量的累积为:

$$C(i, j, k) = I(i, j, k) + r(i, j, k) \quad (13)$$

式中

$$r(i, j, k) = \max C_f(i + m, j + n, k - 1) \quad (14)$$

在对序列图像进行检测时,首帧图像不做处理,直接作为首帧图像的累计结果;从第二帧图像开始利用上述公式对序列图像进行计算,即可实现改进的基于动态规划的运动弱小目标检测。

3 实验结果和讨论

将本文的方法应用于实际运动弱小目标的检测,所采用的试验图像为实拍的一组含有运动弱小目标的红外图像序列,取该序列图像的12帧对算法进行实验。实验采用文献[10]中红外序列图像的白化方法,实验结果如图3所示。

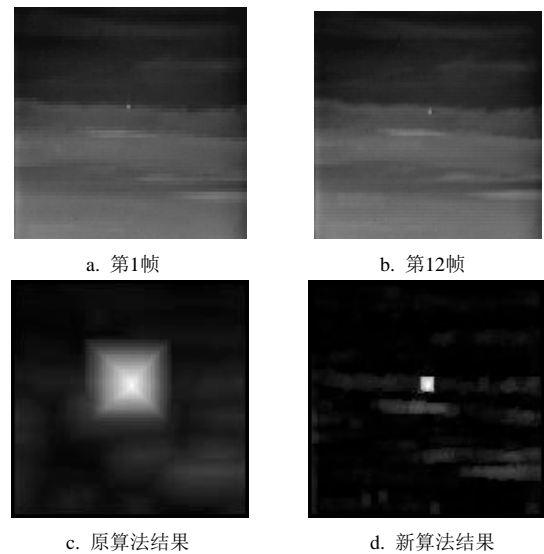


图3 实验结果

图3a和图3b为该序列中挑出的两帧,图3c为直接进行动态规划方法得到的结果,图3d为采用本文的算法得到的结果。从实验结果中可以看出,直接进行动态规划方法,目标像素点以及其中的部分背景像素点存在严重的能量扩散;当帧数进一步增多时,扩散的能量将会出现叠加,导致后续的目标检测出现虚警。而执行本文的方法表明,目标能量在累积的过程中并没有出现多少扩散,目标信号得到了有效的增强,而此时背景像素中也没有出现较大的能量累积,更有利于后续的目标检测。

为了更精确地比较两种算法的优缺点,本文分别计算出该组红外序列图像两种算法所得结果中目标的信噪比,结果如表1所示。

表1 信噪比结果

	目标强度	背景均值	背景标准差	信噪比
原算法	851.69	124.56	118.43	6.14
新算法	703.83	34.16	45.58	14.69

从表中可以看出,本文的算法所得的信噪比远

高于基于动态规划运动弱小目标检测算法的信噪比, 约是后者的2.39倍, 表明本文的算法在很好地抑制目标能量扩散的同时, 并没有损失目标的能量, 对目标的信噪比有明显的提升作用, 对背景噪声也有一定的抑制。

4 结 论

本文给出了一种改进的基于动态规划的红外序列图像运动弱小目标检测方法, 以目标的运动特性为基础, 依据运动弱小目标在前一帧的运动特性, 构造出不同方向的高斯模板来描述目标在当前帧中可能出现的位置。将本文的方法应用于实际的红外序列图像的运动弱小目标的检测。结果表明, 该方法在有效地累积目标能量的基础上, 能大幅地降低基于动态规划的运动弱小目标检测方法的能量扩散问题。

参 考 文 献

- [1] LIU Hu, ZHU Li-li, ZHANG Huan-chun. Multi-deme parallel FGAs-based algorithm for multitarget tracking[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2006, 4(1): 12-17.
- [2] 姚远程, 马 上. 一种视频图像中运动目标检测方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 458-460.
YAO Yuan-cheng, MA Shang. Research on method for moving detection in video images[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(4): 458-460.
- [3] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1): 144-156.
- [4] 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.
- [5] ARNOLD J, SHAW S W, PASTERNAK H. Efficient target tracking using dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 44-56.
- [6] 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 Shang-feng, CHEN Hua-ming, LU Huan-zhang. 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.
- [7] 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 Bing, LU Huan-zhang. Dynamic programming algorithm for detecting moving point targets[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(12): 1895-1900.
- [8] 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.
TAN Xiao-yu, CHEN Mou, JIANG Chang-sheng. Applications of improved dynamic programming algorithm in small targets detection[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 23-27.
- [9] NICHTERN O, ROTMAN S R. Parameter adjustment for a dynamic programming track-before-detect-based target detection algorithm[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008: 1-19.
- [10] 徐 军, 向健勇, 林晓春, 等. 背景预测方法在空中红外弱小目标检测, 识别中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(4): 471-474.
XU Jun, XIANG Jian-yong, LIN Xiao-chun, et al. Application of background forecast in detection and acquisition of the aerial infrared small and weak targets[J]. Journal of Xidian University, 1998, 25(4): 471-474.

编辑 黄 莘