

相邻帧间匹配的迎头点目标跟踪算法

王乐东 王江安 康 圣 宗思光 周润芝

(海军工程大学光电对抗与光通信研究所, 湖北 武汉 430033)

摘要 针对海空复杂背景下迎头点目标检测与跟踪难题,提出了一种基于相邻帧间匹配的边检测边跟踪算法。算法对相邻红外图像序列帧间点与点的邻域匹配,标记匹配结果兴趣区域像素点,统计标记次数,与输入单帧图像同步显示迎头目标检测结果。算法主要特点在于无需提前假定疑似目标点位置,单个匹配过程与当前相邻两帧外的其它序列帧无关,整个匹配过程不随目标数目多少或运动状态变化而改变。根据仿真和实拍照片实验,证实了理论上区别于传统算法的上述优点,在军事应用中具有较高的参考价值。

关键词 图像处理; 目标跟踪; 匹配; 点目标; 红外图像; 阈值

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092911.3004

An Algorithm of Adjacent Frame Matching Used for Head-on Point Targets Tracking

Wang Ledong Wang Jiang'an Kang Sheng Zong Siguang Zhou Runzhi

(*Institute of Electro-Optical Countermeasures and Optical Communication, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China*)

Abstract Aiming at the detecting and tracking of head-on point targets in complicated sea-sky background, an algorithm that could detect while tracking is proposed based on adjacent frame matching. The algorithm obtains the interest region by the adjacent frame matching in infrared image sequences, adopts a mark image to memorize the match result, adopts a statistical image to count the marking times of each pixels and outputs the statistical image to show head-on targets with input images. The algorithm is unique in no need to suppose the doubtful target points in advance; the single match process has nothing to do with other frames, and the whole match process does not change with the target movement state or the numbers of targets. Especially, the algorithm solves the head-on targets detection problems under the highly noisy condition. According to the simulations and experiments under the different condition time after time, it has been confirmed that the advantage above with high application value is different from the traditional algorithms and this method is of feasibility and validity.

Key words image processing; target tracking; match; point target; infrared image; threshold value

1 引 言

红外探测系统具有较好的隐蔽性和较高的抗干扰能力,在复杂电磁作战环境中,能够及时地远距离捕获、跟踪、锁定目标,可为指挥系统决策和武器系统应对赢得时间。针对红外图像序列的弱点目标检测与跟踪问题成为当前研究的一个热点问题,许多

单帧检测算法已经实现了较低的虚警率,能将单帧图像的虚警个数控制在个位数^[1]。相比之下,针对红外序列图像的点目标跟踪的研究还不够深入,而且传统算法^[2~5]存在着一些不足。首先,算法可以实现常规运动状态目标的轨迹跟踪,却不能解决迎头目标的检测和跟踪问题。其次,算法对同一假定

收稿日期: 2008-11-14; 收到修改稿日期: 2009-02-19

基金项目: 总装“十一五”预研项目(4010605020402)资助课题。

作者简介: 王乐东(1985—),男,硕士研究生,主要从事目标检测与轨迹跟踪等方面的研究。E-mail: wld1012@163.com

导师简介: 王江安(1951—),男,博士生导师,主要从事目标检测与轨迹跟踪、图象处理及信息融合、大气光探测、气泡光散射、激光通信、激光致声等方面的研究。E-mail: gdyfzx@163.com

目标点的检测需多帧共同匹配,匹配与判断结构复杂,存储量大,运算速度低,不能与输入图像同步显示跟踪结果,实时性差。最后,算法必须预先假定可能目标点位置,才能对序列帧进行匹配,易丢失突然出现或消失的目标,检测概率低,可靠性差。

目前的高科技武器均可实现远距离锁定目标,都在强调武器的全向攻击能力,特别是迎头攻击能力。无论是对攻击方还是预警方来说,迎头目标的检测与跟踪都有着极高的研究价值。因此,研究出一种针对红外序列图像的检测算法来解决迎头目标的跟踪问题是当前一个亟待解决的内容。

为了解决上述问题,提高算法实际应用价值,提出了一种相邻帧间匹配的迎头点目标跟踪算法。实验结果表明,该算法不仅具有检测概率高、虚警率

低、跟踪识别速度快等优点,还可以解决传统算法无法处理的高噪声环境中迎头点目标跟踪问题。

2 算法基本描述

依据海空背景下迎头点目标具有运动速度快、连续性好、运动轨迹不明显等物理特性和目标红外成像面积小、目标点序列图像帧间位移不大等特点,算法对相邻两帧间像素点与对应点的邻域匹配,标记匹配结果感兴趣区域,统计匹配成功次数显示迎头点目标。算法主要流程如图 1 中(a)图所示,先遍历 D_i 中像素点与 D_{i-1} 中对应点为中心的邻域匹配,取标记帧矩阵 C 用来记录匹配结果,取统计帧 S 记录 C 中各点像素值更新次数,输出矩阵 S 可显示迎头目标。

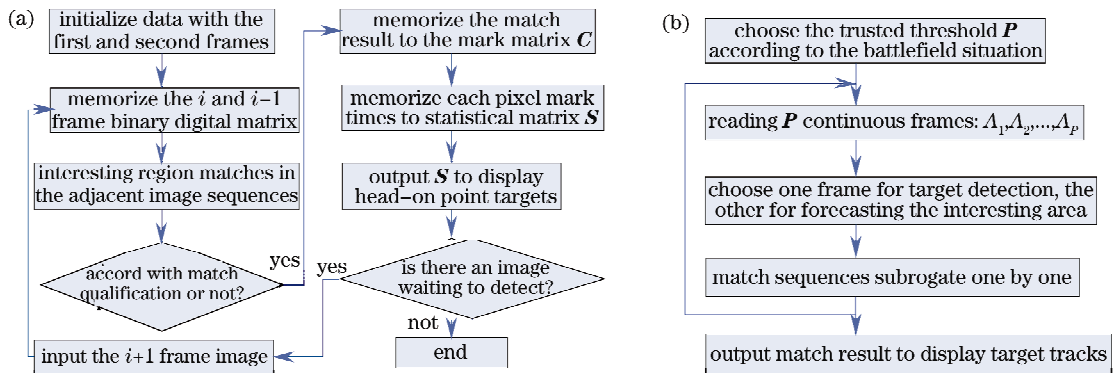


图 1 算法主要流程图。(a)本文算法流程图; (b)文献[2]算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm. (a) flow chart of algorithm in this article; (b) flow chart in reference [2]

从传统算法如文献[2]算法流程图 1(b)可以看出,算法完成单个匹配过程需 P 帧图像且必需提前知道可能目标点位置,出队入队及感兴趣区域判断结构复杂,信息存储量大。相比之下,本算法不需要假定目标点位置,仅需两帧就能完成单个匹配过程,结果感兴趣区域存入标记帧 C 中,算法模型结构简单,数据存储量小。其次,文献[2]算法不能解决迎头点目标问题,若目标运动轨迹不明显时就认为是虚警点,丢失了最具威胁的迎头目标。

3 算法模型建立

目前大部分跟踪算法^[5~8]均是在预先判断疑似目标点位置的前提下才能进行轨迹判断。为区别传统方法,本算法采取对当前帧与前一帧图像匹配来突出跟踪过程不需提前判断可能目标位置。直接对单帧图像应用多向梯度表决融合目标检测算法,处理结果作为本算法的待输入序列图像。具体过程如下:

1) 初始化。设 $D_i(x, y)$ 表示当前待检测图像

矩阵 D_i 中第 x 行 y 列的像素点、步长为 k 、阈值为 h 、 $Window_{n \times n}^i(x, y)$ 表示第 i 帧中以 (x, y) 为中心的 $n \times n$ 邻域 ($n = 2k + 1$), $Sum[Window_{n \times n}^i(x, y)]$ 为 $n \times n$ 邻域内所有像素值之和。算法单个匹配过程仅在相邻两帧间进行,现以目标运动速度不大于 3 pixel/frame 为例,介绍算法匹配过程和感兴趣区域的确定。读取第 1 和第 2 帧二值图像记为 D_1 和 D_2 (也可以间隔几帧读取),可知矩阵 D_1 与 D_2 行列相同,且矩阵中只有像素值为 1 的疑似目标点和像素值为 0 的疑似背景点。

2) 相邻帧间匹配。如果 $D_i(x, y) = 1$ 且 $Sum[Window_{n \times n}^{i-1}(x, y)] > 0$ 则称单个像素点 $D_i(x, y)$ 匹配成功, D_i 中第 x 行 y 列就被算法称为感兴趣区域像素点,为可能目标点。按单个像素点匹配过程遍历 D_i 全部像素点 $D_i(x, y)$, 完成单个相邻帧间匹配操作。取输入当前帧矩阵 D_2 [图 2(a)] 和前一帧矩阵 D_1 [图 2(b)] 的前 5 行与前 5 列,当 $k = 1$ 时, $D_2(3, 3) = 1$, $Sum[Window_{3 \times 3}^1(3, 3)] > 0$, 则点 $D_2(3, 3)$ 为感兴趣区域像素点;若前一帧矩阵 D_1 对应部分如图 2(c) 所

示, $D_1(2,4) = 1$, 有 $\text{Sum}[\text{Window}_{3 \times 3}^1(3,3)] > 0$ 成立, 匹配成功。若 D_1 对应部分如图 2(d) 所示, $D_1(5,5) = 1$, 即 $\text{Sum}[\text{Window}_{3 \times 3}^1(3,3)] = 0$, 称步长 k

为 1 时, 匹配条件不成立, $D_2(3,3)$ 像素点不是兴趣区域。当步长为 2 时, $\text{Window}_{5 \times 5}^1(3,3)$ 内有一点 $D_1(5,5) = 1$, 匹配条件成立 $D_2(3,3)$ 为兴趣区域。

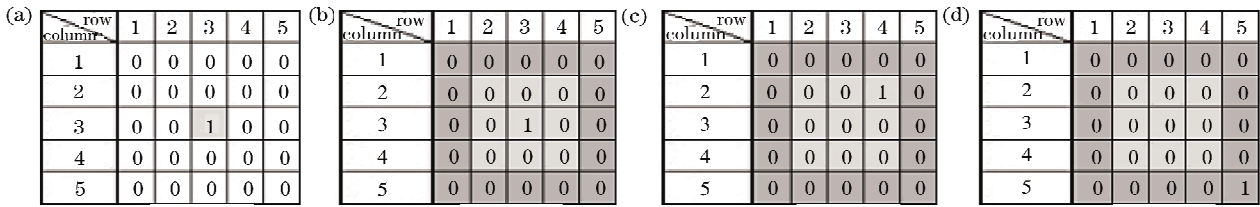


图 2 算法主要匹配过程

Fig. 2 Primary match process

3) 兴趣区域标记。C 为与 D_i 相同行列的全零矩阵, 如果 $D_i(x,y)$ 为兴趣区域像素点, 则令 $C(x,y) = 1$ 完成对单个像素点 $D_i(x,y)$ 的标记。若图 2 中 $D_2(3,3)$ 为兴趣区域像素点, 则有 $C(3,3) = 1$ 。随着 D_i 中全部像素点的匹配, 标记兴趣区域像素点, 完成对单帧的兴趣区域标记。顺序输入序列图像, 相邻两帧间重复上述操作, 完成序列匹配结果标记。当信噪比较低时, 输出 C 可以得到常规运动状态的点目标跟踪轨迹。

4) 兴趣区域统计。取与 C 相同的矩阵 S, 点对点记录 C 中对应位置像素值更新的次数, 阈值门限输出 S, 可以判断是否是迎头目标。若 $C(3,3) = 1$ 且被标记 5 次, 则有 $S(3,3) = 5$ 。迎头目标特点是目标点移动范围在以同一像素点为中心的邻域内, 即邻域内像素值更新次数就多。阈值 h 设置不同值时可保证不丢失迎头目标点, 甚至没有虚警点。

5) 匹配帧更新。读取下一帧待输入图像 D_{i+1} , D_{i+1} 为当前待检测帧, 释放第 $i-1$ 帧图像, 转入第二步相邻帧间匹配过程。若读取第 3 帧待检测帧 D_3 则释放 D_1 , 在 D_3 与 D_2 中进行匹配。

4 试验及工程验证

4.1 隐藏在常规运动状态目标中的迎头点目标的检测与跟踪

试验为在典型海空背景红外图像 (320 pixel ×

240 pixel) 中随机加入信噪比为 1 的弱点目标, 采用梯度量级步长为 2 (阈值梯度大小为 1.6) 检测算法^[1]对图像进行检测。从单帧处理结果[图 3(a)]可以得到, 大部分的噪声点已基本滤除。为了突出算法的优点, 我们向多向梯度检测后的 40 frame 图像中随机加入 100 个仿真虚警点[图 3(b)]。试验参数如下: 3 个迎头飞来目标, 分别位于 (120, 80), (120, 160) 和 (120, 240) 三个位置, 常规运动目标 V_1 和 V_2 初始位置分别为 (40, 45), (50, 260), 目标 V_1 和 V_2 累计速度 (pixel/frame) 分别为 $V_{1x} = 2$, $V_{1y} = 2$, $V_{2x} = 2.5$, $V_{2y} = -2$, 共连续 40 frame 图像。从第 1 帧输入图像图 3(b) 可以看出, 单帧图像中都带有大量的仿真虚警点, 顺序输入 40 frame 图像, 在输入第 36 帧图像匹配步长为 2 时, 标记帧 C 显示的结果如图 3(c) 所示。目标 V_1 累计速度 (pixel/frame) 为 $V_{1x} = 2$, $V_{1y} = 2$, 帧间目标像素点移位为 2 pixel, 步长为 2 时, 形成完整的运动目标轨迹[图 3(c)]。目标 V_2 累计速度 (pixel/frame) 为 $V_{2x} = 2.5$, $V_{2y} = -2$, 帧间垂直方向上目标运动为 2.5 pixel, 与不同的整数相乘后取整结果等于 2 的点数为 19 个。在第 36 帧时刚好出现第 18 个点, 理论计算与仿真结果显示相同[图 3(c)]。步长为 3 时, 两个目标点帧间位移均小于 3 pixel, 全部匹配成功, 显示完整运动轨迹。

由于 40 frame 图像中均加入了这三个点, 则矩



图 3 算法对隐藏在运动目标中的迎头点目标检测与跟踪结果。(a)背景图像;(b)第 1 帧;(c)标记帧

Fig. 3 Detecting and tracking result of head-on point targets. (a) background image; (b) first frame; (c) mark frame

阵 S 在这 3 个像素点位置上将会更新 39 次。试验结果发现,像素值更新次数超过 2 的有 8 个点,更新次数超过 3 的有 3 个点,即统计帧 C 在阈值 $h = 1$ 时结

果显示与图 3(c)相同, $h=2$ 时有 8 个点[图 4(a)], h 设置阈值为大于 3 小于 40 时均可检测出 3 个迎头点目标[图 4(b)],且没有虚警点。

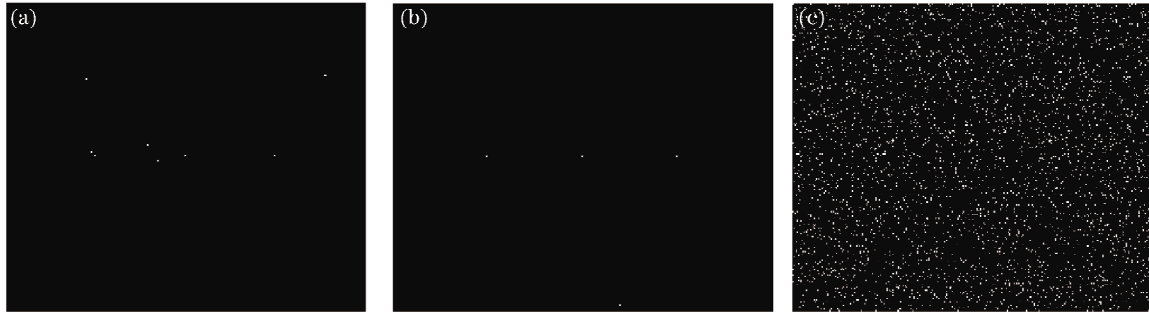


图 4 算法设置不同阈值对迎头点目标跟踪结果的影响。(a) $h=2$ 时的图像; (b) $h=3\sim 39$ 时的图像; (c) 高噪声图像

Fig. 4 Influence of different threshold value on detecting result (a) image($h=2$); (b) image($h=3\sim 39$);

(c) high-noise image

实验结果得出,本算法不仅可以解决迎头点目标问题,还可以解决信噪比为 1 的常规运动状态弱点目标轨迹跟踪问题。传统算法也可以解决常规运动状态轨迹跟踪,但对无法对迎头目标做出判断,只能按虚警目标点处理。

4.2 高噪声条件下多个迎头点目标的检测与跟踪

为了验证算法在高噪声或多个虚假目标环境下的适用情况,我们向海空背景红外图像序列(640 pixel \times 480 pixel)中加入了密度为 0.1 的椒盐

噪声,即单帧图像中加入 30720 个仿真虚警点[图 4(c)]。将这样 30 frame 图像中加入三个迎头点目标 $M1, M2, M3$ 中心分别位于(200, 180), (200, 320), (200, 460)的十字形的点目标,3 个目标共占用 15 pixel。顺序输入序列图像,执行算法流程,步长为 1 时,输出标记帧 C [图 5(a)]可以看出在高噪声情况下,几乎所有的像素点都得到了标记,即不能对常规运行状态目标做出轨迹判断。

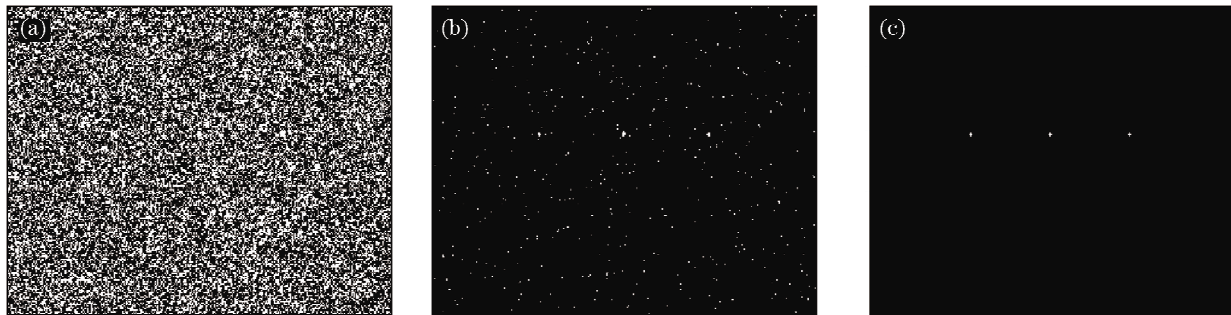


图 5 算法在高噪声情况下迎头目标检测与跟踪结果。(a) 标记帧图像; (b) $h=5$ 时的图像; (c) $h=10\sim 29$ 时的图像

Fig. 5 Detecting and tracking result under the high-noise condition. (a) mark image; (b) image($h=5$);

(c) image($h=10\sim 29$)

由于高科技武器强调精确打击能力,飞行过程中引导头始终向对准目标的方向调整,故对防御方来说,迎头目标帧间速度低,相对位移一般在几个像素内,这就为步长选取提供依据;加上迎头点目标本身占有几个像素,相邻帧间匹配结果兴趣区域与噪声和常规运动目标的标记次数有很大的差别,这就为阈值选取提供了空间。从表 1 得到,步长为 1,阈值 $h=5$ 时跟踪结果有 506 个虚警点[图 5(b)], $h=$

8 时有 4 个虚警点,即有 19 个点像素值更新次数大于 8,阈值选取 10 到 29 中任一整数时,可得到 3 个迎头点目标所占的 15 个像素点,在此噪声情况下仍能判断出迎头目标,尤其是接近 100% 的检测概率、超低虚警率、大范围的阈值设置,都是一般算法不可能达到的。在实际应用中,可以通过改变步长来适应目标帧间移位大小,平衡检测概率、虚警率和实时性之间的关系。

表 1 步长 k 和阈值 h 对检测概率和虚警概率的影响Table 1 Influence of different step k and threshold h on detection probability and false-alarm probability

different step k selection	$k=1$						$k=2$						
	set threshold in statistical matrix S	$h=5$	$h=6$	$h=7$	$h=8$	$h=10$	$h=29$	$h=5$	$h=7$	$h=9$	$h=13$	$h=15$	$h=29$
the number of head-on point targets detection	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
result													
the number of noise points after detection	506	149	37	4	0	0	4174	1308	347	8	0	0	0

4.3 实拍红外序列图像迎头目标跟踪的工程验证

上文试验的结果证明,针对点目标的检测与轨迹跟踪问题,本文提出的相邻帧间匹配算法是可行的、可靠的。本节再结合舰载光电跟踪仪实拍红外序列图像进行轨迹检测与跟踪的算法验证,在海空背景下以距离约 20 km 处的飞机作为点目标对象,由于目标距离远、成像面积小、相对运动速度低,帧间移位不大。实际工作过程中,光电跟踪仪能够实时地对它所监控区域进行连续拍摄,连续选取 40 frame 图像。按照匹配流程,对序列进行帧间匹

配,最后实现目标的快速检测与跟踪定位。

从第 6 帧原始图像图 6(a)中无法判断两目标是否为迎头目标。步长为 1 时,在输入第 40 帧序列图像时标记帧 C 如图 6(b)所示,得到一个常规运动目标轨迹和一个传统算法无法解决的非常规运动的迎头目标。由于迎头目标像素点每帧所占的位置在相同的区域内,必然矩阵 S 在目标区域像素值更新次数较多,算法在输入第 6 帧门限阈值为 3 时就可以判断出迎头点目标,随着输入图像帧数的增多就更加肯定,阈值为 10 时得到迎头目标跟踪结果[图 6(c)]。

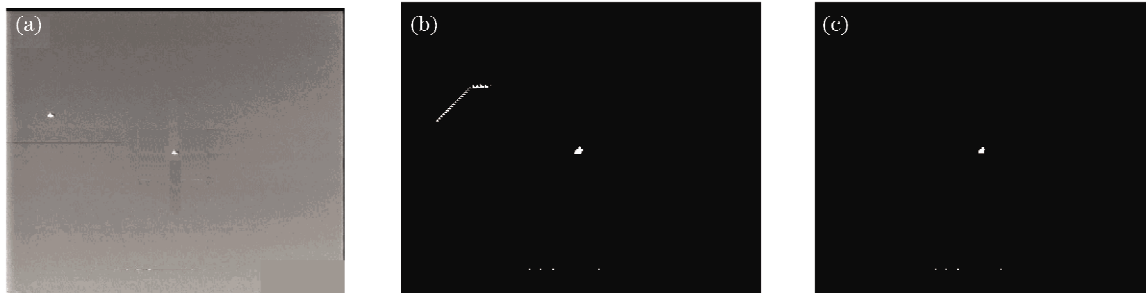


图 6 真实迎头点目标红外图像轨迹跟踪。(a)第 6 帧序列图像;(b)标记帧图像;(c)统计帧图像

Fig. 6 Detecting and tracking result under the high-noise condition. (a)the 6th frame; (b)mark frame; (c)statistical frame

实验结果表明,本算法可以解决迎头目标检测难题,也可以解决常规运动目标的轨迹跟踪问题,随着红外图像输入帧数的增加,点目标轨迹所在像素点也增加,虚警目标轨迹几乎不可能具有这种规则性变化,因此,经历若干帧的处理后,真实目标的轨迹会很容易被区分出来。

5 结 论

本文提出的相邻帧间匹配算法能够有效地解决迎头目标的跟踪难题,同时在信噪比大于 1 的条件下能够对常规运动目标进行轨迹跟踪。实验结果更加突出了算法的几个特点:采取遍历点对点的邻域匹配,避免了提前假定目标点位置,完成单个帧间匹配同步输出匹配结果,对迎头目标的检测概率提高

到 98% 以上同时保持较低虚警率;采取标记帧点对点记录匹配结果,统计帧点对点记录匹配成功次数,脱离序列图像本身来记录目标位置坐标;采取多步长适应目标运动状态,可有效平衡检测概率、虚警率和实时性要求之间的关系。

但是,前期单帧图像预处理算法选取对算法跟踪结果有一定的影响,阈值设置过高可能造成丢失目标,过低可能增加单帧的虚警点数目,算法实时性将会降低,这是进一步完善算法必须考虑的一点。其次算法可有效解决高噪声情况下迎头目标跟踪问题,但对同等噪声条件下无法对常规运动状态目标轨迹进行判断,这是下一步改进算法必须解决的问题。

参 考 文 献

1 Zong Siguang, Wang Jiangan, Chen Qishui. New detection

- algorithm for dim IR point targets under complicated sea and sky background[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(4): 9~12
- 宗思光, 王江安, 陈启水. 海空复杂背景下红外弱点目标检测新算法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(4): 9~12
- 2 Wang Jiangan, Kang Sheng, Ye Limin. The tracking algorithm based on pipelining-queue for dim-point target [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(9): 1~4
- 王江安, 康 圣, 叶利民. 基于队列流水线的弱点目标轨迹跟踪算法[J]. *光电工程*, 2007, **34**(9): 1~4
- 3 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. An adaptive background adjusting algorithm for dimtarget detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 管志强, 陈 钱, 钱惟贤 等. 一种背景自适应调整的弱点目标探测算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2163~2168
- 4 Yan Xiong, Peng Jiexiong. An extended track-before-detect algorithm for infrared target detection [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1997, **33**(3): 1087~1092
- 5 Zhang Bing, Lu Huanzhang. The predicting and matching detection algorithm of moving pointtarget in image sequences [C]. *Proce. IEEE ICNNSP*, 2003: 1151~1154
- 6 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. Infrared target tracking algorithm based on algorithm fusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 860~865
- 管志强, 陈 钱, 钱惟贤 等. 一种基于算法融合的红外目标跟踪方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 860~865
- 7 Johnston L. A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(1): 228~241
- 8 Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays based on steady-state Kalman filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1697~1702
- 刘永进, 朱 红, 赵亦工. 基于稳态卡尔曼滤波的红外焦平面阵列非均匀校正算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1697~1702