

doi:10.3788/gzxb20184711.1110002

大视场红外空中小目标梯度熵权质心跟踪方法

张帅,刘秉琦,黄富瑜,余皓,陈一超,王子昂

(陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系,石家庄 050003)

摘 要:针对大视场红外凝视成像系统中非相似成像对目标形状、运动规律产生畸变影响而造成的跟踪困难,提出了一种基于梯度熵权的目标质心定位模型,并结合卡尔曼滤波实现了大视场中多目标跟踪.该模型利用灰度梯度来描述小目标的概率分布,并求取目标 8 个方向区域内的梯度熵权,来表示目标不同位置与质心的相关程度.提出了多方向最大梯度法来提取大视场中的天地分界线,确定深空背景区域,通过背景抑制提取航迹起始点.采用线性路径规划方法,解决了目标相遇时卡尔曼滤波模型之间的互相干扰问题.实验结果表明:所提方法在视场角为 70° 和 180° 的三种背景下,可准确跟踪多个航模、飞机和导弹目标,与传统跟踪方法相比,跟踪中心定位误差低、准确率高,平均帧速提高了约 1.5 倍.

关键词:红外大视场;目标跟踪;卡尔曼滤波;航迹起始点;梯度熵权质心定位模型

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1110002-11

Gradient Entropy Weighted Centroid Method for Air Target Tracking in Infrared Wide Field

ZHANG Shuai, LIU Bing-qi, HUANG Fu-yu, YU Hao, CHEN Yi-chao, WANG Zi-ang
(Department of Electronic & Optics Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to overcome the tracking difficulty caused by distorted shape and motion law of the target of non-similar imaging in infrared wide-field staring system, a gradient entropy weighted centroid model is proposed. The multi-targets tracking is achieved by combing Kalman filters with this model. The model adopts gray value gradient to describe the probability distribution of dim target. The gradient entropy weights in 8 directions of target are obtained to indicate the correlation between the different regions and centroid of the target. Meanwhile, multi-direction maximum gradient method is proposed to extract the sky-ground line in wide field and obtain the position of the deep space background. Then, the starting point is detected through background suppression. The linear path planning is adopted to solve the mutual interference of Kalman filtering models when the targets meet. The experiment results show that the proposed method can track aeromodellings, airplanes and missiles in three environments in field view of 70° and 180° . Compared with the traditional tracking method, the proposed method has a lower center location error and a high accuracy, and the average frame rate is increased by about 1.5 times.

Key words: Infrared wide-field; Target tracking; Kalman filter; Starting point; Gradient entropy weighted centroid model

OCIS Codes: 100.4999; 200.4560; 330.4150

0 引言

红外探测系统因其被动式探测、隐蔽性优良等优势,被广泛用于战场侦察和预警等领域.随着现代武器

基金项目:国家自然科学基金(No. 61801507)资助

第一作者:张帅(1992-),男,博士研究生,主要研究方向为红外目标检测和跟踪、视觉处理. Email: zhangshuaioc@163.com

导师:刘秉琦(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为军用光电系统设计及应用. Email: whelmail@sina.com

通讯作者:黄富瑜(1985-),男,讲师,博士,主要研究方向为光电对抗与图像信息处理. Email: hfyoptics@163.com

收稿日期:2018-05-10;录用日期:2018-08-30

<http://www.photon.ac.cn>

向着快速化、小型化发展,现代战场呈现出“全方位实时”打击的特点,红外探测系统需要能够实时感知各个方向的来袭攻击^[1].大视场红外凝视系统具有探测空域大、实时性好、体积小等独特优势,因此,在机器视觉、自主导航、激光告警、目标识别跟踪等领域有着广阔的应用前景^[2].美国于20世纪90年代发展该项技术,于2005年研发出一种超广角机载红外系统,用于战机起飞和着陆过程中的来袭导弹预警^[3].法国MBDA公司于2010年研发出一种新型导弹大空域预测系统,并在次年配备于“阵风”战斗机.复杂环境下的红外弱小目标检测跟踪一直是图像处理 and 计算机视觉领域的研究热点之一.

目前,针对小视场红外目标的检测跟踪算法比较成熟,例如光流法、基于目标特征的跟踪方法、基于质心定位的跟踪方法等^[4-6],但是,针对大视场中的红外目标检测跟踪研究尚少,主要是存在以下难点:1)相比小视场,大视场背景更为复杂,噪声干扰更多,目标在探测器上的能量弱,信噪比低;2)从大视场中央到边缘,目标形状发生变化,固定的目标模型难以适用;3)目标的直线运动受非相似成像机制影响,表现为具有一定曲率的曲线.采用空时域融合的方法可有效解决这些问题.文献[7]介绍了一种空时域双边滤波器并用于小目标探测.文献[8]介绍了一种视频序列中的目标分割检测方法.但是,这些方法注重于大视场红外小目标检测,并未细致地分析大视场中红外目标跟踪方法.文献[9]提出一种在可见光波段基于质心加权的卡尔曼跟踪方法,但红外大视场背景更加复杂,且目标形状产生变化,应用效果并不理想.为此,本文提出一种基于梯度熵质心定位(Gradient Entropy Weighted Centroid, GEWC)模型的卡尔曼空中多目标跟踪方法.梯度熵质心定位模型采用目标灰度梯度的概率分布来表征目标形状、求取相应的目标质心,可排除大视场背景非均匀性和目标形变的影响,以目标8个方向区域内的梯度熵表示不同区域与质心的相关程度,从而更精准逼近质心.此外,在大视场中提出多方向最大梯度法,用于检测提取大视场中的天地分界线;采用运动约束和线性路径规划,解决目标相遇过程中滤波模型间的互相干扰问题.

1 大视场红外小目标定位模型

本文方法的流程如图1所示.按照天地线检测、最小化背景抑制、航迹初始点确定和多目标跟踪的步骤进行,通过结合梯度熵质心定位模型和卡尔曼滤波,实现数据递推和目标跟踪.

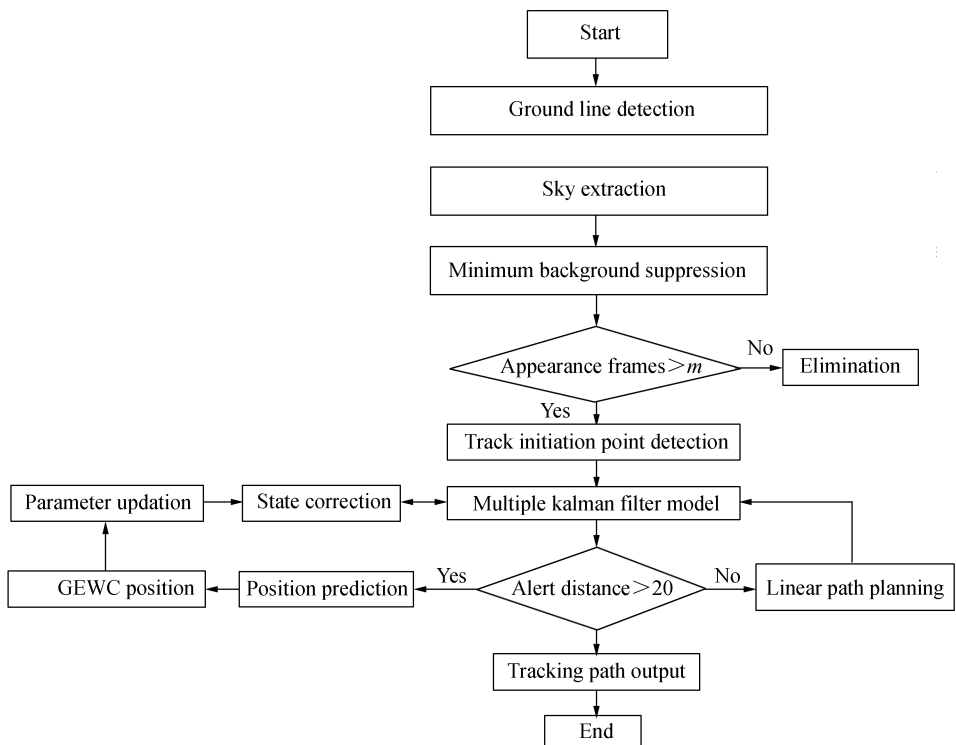


图1 本文方法流程
Fig.1 Flow of proposed method

1.1 航迹起始点定位

红外大视场在扩大探测空域的同时,不可避免地引入了更多干扰信号,例如地气系统、星体、云层和探测器非成像区域等,如图 2.研究所感兴趣的只是所占图像很小一部分的目标区域,而由于深空背景相对简单,利于抑制干扰信号,为降低运算负荷,一般调整红外大视场系统,使目标尽量在深空背景内成像.因此,确定大视场深空背景区域的过程必不可少,而且需要考虑到非相似成像带来的影响,主要分为两个方面:

一方面,在大视场中,探测器非成像区域不参与实际成像,一般分布在视场的四个边角.根据非相似成像规律,采用式(1)判决 (i, j) 是否为实际成像点.

$$\| (i - i_0, j - j_0) \| > R_{\max} + \Delta r \quad (1)$$

式中, (i_0, j_0) 是图像畸变中心, R_{\max} 是视场角边缘对应的最大像素半径, Δr 是修正参数,主要用于排除视场边缘梯度变化的影响.

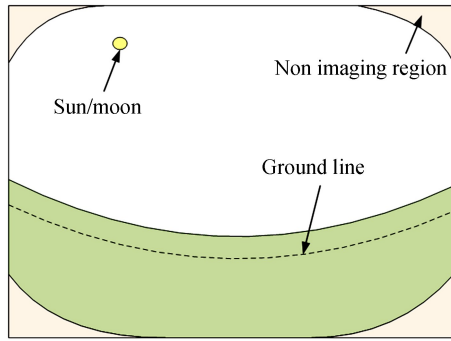


图 2 大视场成像图像

Fig.2 Imaging sketch map of wide field of view

另一方面,地气系统中的灰度极值点易被误判为目标点,因此,提取天地分界线至关重要.一般而言,天地线附近的梯度要高于地气系统和天空背景,可依据此原理来提取天地分界线.但是,天空大量云层和地面复杂背景会对天地线检测造成干扰,从而造成区域误分.连续云层内的灰度值比较连贯,但与地气系统相比,灰度方差较小,因此如果提取到云层分界线,可利用分界线两侧的方差约束来判断、排除;散状云层和地面复杂背景内的干扰区域位置随机分布,不严格符合天地线连续分布的规律,故可利用位置约束来排除,约束规则为

$$\begin{cases} V_{g(x,y)} \in S_1, g(x,y) \in S_2 < V_{g-Th} \\ V_{L(x,y)} < V_{L-Th} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $V_{g(x,y)}$, $V_{L(x,y)}$ 分别是分界线两侧邻域灰度值方差、分界线上各个点坐标位置方差, V_{g-Th} , V_{L-Th} 分别是邻域灰度值和位置方差选择阈值, S_1 、 S_2 分别是云层邻域和深空邻域.

同时,由于畸变影响,天地线越靠近视场边缘,曲线的曲率越大,而且地面景物多样,造成其梯度方向并不严格一致.为更准确地提取天地线,以 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向为基准来寻找梯度最大值,如式(3)所示,表示按照四个方向提取得到的梯度最大值,从而确定天地线上点的位置.

$$\begin{cases} G_0(i, j) = |f(i+n, j) - f(i-n, j)| \\ G_{45}(i, j) = |f(i-n, j+n) - f(i+n, j-n)| \\ G_{90}(i, j) = |f(i, j+n) - f(i, j-n)| \\ G_{135}(i, j) = |f(i+n, j+n) - f(i-n, j-n)| \\ G_{\max}(i, j) = \max(G_0, G_{45}, G_{90}, G_{135}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, f 表示原图像, G_0 、 G_{45} 、 G_{90} 、 G_{135} 表示原图像在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 方向上的梯度值, G_{\max} 表示提取得到的梯度最大值.

复杂地面和云层背景下的天地(海)线提取效果如图 3 所示,图 3(a)、(c)分别是地面和海天-云层背景,图 3(b)、(d)分别是图 3(a)、(c)的天地(海)线提取结果.图 3(b)中,地气系统中的干扰分布零散,可予以排除,图 3(d)中,云层内各处的灰度值相近,而海面上的灰度值变化较为剧烈,据此可判断真实海天分界线.针对深空背景中存在的星体、图像非均匀性、噪声、探测器盲点等干扰,采用最小化背景预测模型来抑制背景、

增强目标信号^[10].根据大视场中红外目标实际成像和 2014 年 SPIE 的标准^[11],设置 5×5 的滑动窗口,利用邻域信息估计空中背景.

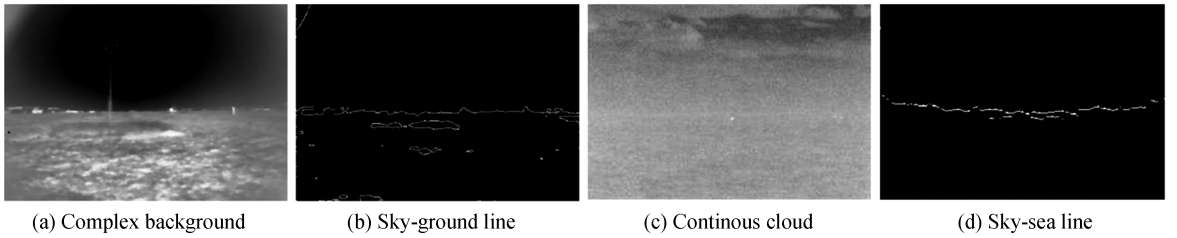


图 3 复杂地面和云层的天地(海)线提取效果

Fig.3 Sky-ground and sky-sea line extraction results in complex background and continuous cloud

1.2 梯度熵权质心定位

在整幅图像中进行目标检测跟踪,势必成倍增加运算量,因此采用“滤波-数据关联”的跟踪模式.在数据关联中,通过对目标精确定位来修正目标预测位置,从而优化滤波模型,达到准确跟踪的效果.但是,由于采用非相似成像机制,在距离相同情况下,同一目标在大视场中不同位置所成像的形状和大小有所区别.图 4 为空中小目标在大视场 $\omega = 30^\circ$ 、 $\omega = 50^\circ$ 、 $\omega = 80^\circ$ 位置处的形状及灰度分布.可以看出,目标的形状仍近似符合二维高斯成像规律,但不再是单纯的圆形或者椭圆形,形状变化明显,质心偏离椭圆或者圆形中心.进一步研究发现,从目标边缘到内部,其梯度呈规律性分布,且与目标邻域相比,梯度值差异明显,据此可在预测窗口中判断目标位置.因此,利用梯度分布来表征目标在大视场图像中的真实分布,可以克服背景非均匀性和目标形变多样性带来的干扰,从而完整描述目标形状,而对于预测窗口中存在的噪声干扰,可利用连续多帧轨迹判断予以排除.

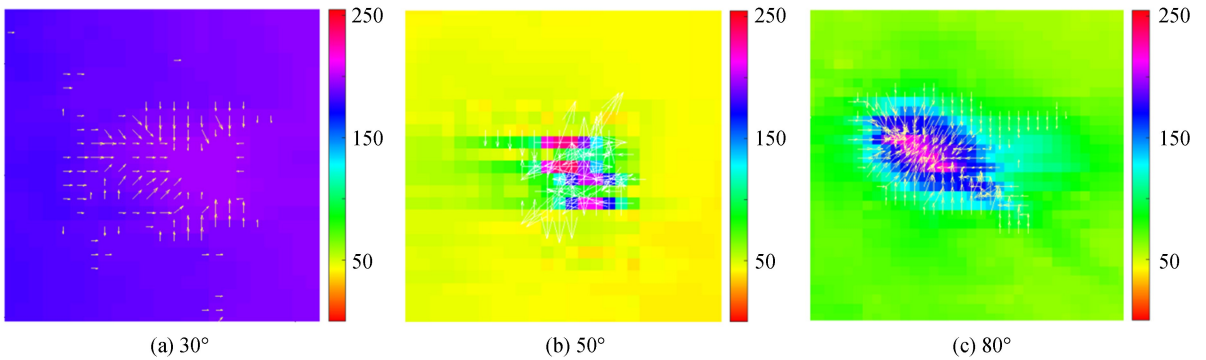


图 4 目标在视场角 30° 、 50° 和 80° 处的形状分布

Fig.4 Shape deformation of target at 30° 、 50° and 80°

在预测窗口中,目标质心检测的准确度很大程度上决定了跟踪精度,因此需克服目标形变和大视场非相似成像的影响,提高质心定位准确度.将目标内部分成 8 个区域,在各个区域内求取不同梯度的概率,来计算该区域所表示的目标质心位置.同时,不同方向区域与质心的相关程度不同,区域内的非零梯度越多、方差越大,说明其更可能属于目标,而不是弥散斑或者邻域背景,应该赋予更大的权值,这样可以更加准确地求取真实质心坐标.梯度熵权质心定位模型如图 5 所示,统计预测窗口内的所有非零梯度值及其位置,计算梯度值的概率分布、对应的质心,最终按照 8 个区域来自适应求取真实目标的质心.建立模型的具体过程为:

1) 在预测窗口的各个方向区域,利用梯度描述目标灰度变化的概率分布特征.

$$\hat{q}_{\text{Gra}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^L k(i)} \cdot \sum_{i=1}^L k(i) \delta(i - g_{\text{Gra}}) \quad (4)$$

式中, \hat{q}_{Gra} 是在某个方向区域内,梯度模值为 g_{Gra} 的像素出现概率; $k(i)$ 是某一方向内梯度模值为 i 的像素出现的次数; $\delta(i - g_{\text{Gra}})$ 用来判断 i 是否与 g_{Gra} 相等,如果相等,其值为 1,否则为 0.

2) 基于梯度值求取其对应的目标质心.

$$M_{\text{Gra}} = \frac{\sum_{i=1}^L k(i) \cdot s_i \cdot \delta(i - g_{\text{Gra}})}{\sum_{i=1}^L k(i) \delta(i - g_{\text{Gra}})} \quad (5)$$

式中, s_i 是梯度模值 i 的像素位置, M_{Gra} 是其相应的目标质心位置.

3) 计算每个区域内非零梯度的熵权, 表征该区域对质心的重要程度.

$$\begin{cases} P_m = \frac{h_m}{\sum_{t=1}^{n \times n \times r} h_m} \\ E_r = - \sum_{a=1}^r P_a \log_2 P_a \\ W_r = \frac{E_r}{\sum_{r=1}^8 E_r} \end{cases} \quad (6)$$

式中, h_m 是预测窗口内目标的梯度模值的概率, P_m 是 h_m 进行归一化后的概率, E_r 和 W_r 分别是第 r 个区域内的梯度模值的熵及熵权.

4) 求取目标质心可等价于求取随机变量的均值, 综合考虑梯度概率分布、不同梯度值对应的目标质心、区域的重要程度, 求取真实的目标质心, 即

$$S_{\text{centroid}} = \sum_{r=1}^8 \sum_{\text{Gra}}^L q_{\text{Gra}} \wedge M_{\text{Gra}} \cdot W_r \quad (7)$$

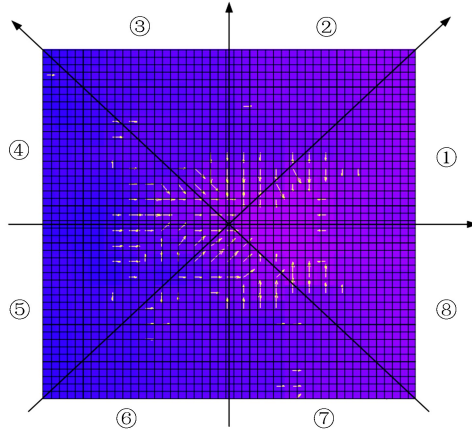


图5 目标在 30° 处的梯度熵权质心定位模型

Fig.5 GEWC model of target at 30°

2 基于卡尔曼滤波的多目标位置预测

2.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波利用“预测-更新-预测”的方式, 实现了系统状态空间的递归运算^[12-13]. 其中, 状态模型用于预测目标的状态, 并结合观测结果对预测结果进行修正. 采用实际检测的质心位置来代替滤波值, 可以使卡尔曼滤波器以最稳定的性能预测目标下一帧的位置, 从而提高跟踪过程的鲁棒性. 结合质心定位模型, 采用卡尔曼滤波来实现目标预测、跟踪, 状态方程和预测方程表示为

$$\mathbf{x}_k = \Phi_k \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{w}_{k-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (9)$$

式中, Φ_k 是状态转移矩阵, \mathbf{H}_k 为观测矩阵, \mathbf{x}_k 是状态变量, 即目标在 k 时刻的位置和速度信息; Γ_k 是输入矩阵, \mathbf{z}_k 是观测变量, 即通过梯度熵权质心定位模型得到的目标质心位置信息; \mathbf{w}_k 是系统的高斯噪声, \mathbf{Q}_k 是其协方差, \mathbf{v}_k 是观测噪声, \mathbf{R}_k 是其协方差, 两种噪声相互独立.

卡尔曼滤波具体可以表示为

$$\mathbf{x}_k^- = \Phi_k \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{w}_{k-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1} \Phi_k^T + \mathbf{Q} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \mathbf{x}_k^-) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (14)$$

式中, $(\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \mathbf{x}_k^-)$ 是新息, 表示 k 时刻目标的预测位置和实际质心检测位置的误差; \mathbf{K}_k 是后验估计中增益矩阵; \mathbf{x}_k^- 是先验状态估计; \mathbf{x}_k 是状态修正值; \mathbf{x}_{k-1} 是 $k-1$ 时刻的状态修正值; \mathbf{P}_k^- 是先验误差协方差; \mathbf{P}_k 是估计误差协方差矩阵。

在卡尔曼滤波中, 目标的运动模型主要包括匀速运动模型 (Constant Velocity, CV) 和匀加速运动模型 (Constant Acceleration, CA), 其中, CV 模型在使用中最为简单^[14]。目标在图像中的速度一般由目标实际速度、侦察系统的分辨率和二者的相对运动角度决定。由于红外大视场系统的视场角大、分辨率低, 目标在图像中的运动速度和机动水平低, 因此, 目标在连续多帧图像中的运动可近似视为匀速运动, 而速度的微弱变化可以用高斯白噪声来描述。为提高跟踪的实时性, 目标运动模型设为 CV 运动模型。

2.2 运动约束的多卡尔曼滤波

在初始图像帧中, 可能存在多个疑似目标, 因此需建立相应数目的卡尔曼滤波模型。为进一步甄选真实目标, 设定 $m=6$ 作为判断基准, 如果目标出现的帧数大于等于 m , 且连续消失的帧数小于 3 帧, 则可判断目标为真, 否则为虚警。同时, 在多卡尔曼滤波模型中, 目标接近或者相遇时会导致模型互相干扰、跟踪失败。为此, 经过多次试验, 设置目标之间的安全距离阈值为 20 个像素, 如果在第 k 帧, 目标之间的距离小于安全距离阈值, 则根据目标短时间内运动的平滑性和连续性, 采用线性路径规划, 利用目标在 $k-1$ 、 $k-2$ 、 $k-3$ 时刻的速度来预测, 直至目标之间距离大于安全阈值, 重新初始化多卡尔曼滤波模型。即

$$s(k) = \frac{3}{2}s(k-1) - s(k-3) \quad (15)$$

式中, $s(k-1)$, $s(k-1)$, $s(k-3)$ 是目标在 k 、 $k-1$ 、 $k-3$ 时刻的位置。

3 实验结果与分析

为验证所提方法在大视场红外系统中的跟踪效果, 序列一、二选取 $2\omega=70^\circ$, $f=10$ mm, $F=2$ 的红外镜头和制冷型中波 ($3\sim 5$ μm) 红外探测器进行实验, 实验目标为空中飞行航模目标, 背景为纯净天空。序列三、四选取 $2\omega=180^\circ$, $f=4.6$ mm, $F=1$ 的红外镜头和非制冷型长波 ($8\sim 14$ μm) 红外探测器进行实验, 序列三的实验目标为飞机, 背景为市内建筑和天空; 序列四的实验目标为发射的导弹, 背景为野外场地和天空。所有序列均采用传输速度为 20 帧/s 的采集卡采集红外视频。实验硬件平台基于 2.2 GHz 的酷睿双核处理器、内存 4 G 的笔记本电脑, 软件为 MATLAB R2014b。

3.1 视场角 70°

序列一共计 220 帧, 为单个空中飞行航模目标, 背景为纯净天空, 非均匀性比较明显。在序列第 6 帧、18 帧和 181 帧, 目标存在 3 次大角度的飞行转弯, 且目标速度呈逐渐增加的趋势, 但在转弯时, 航模速度降低。

卡尔曼滤波模型中, 状态转移矩阵设为 $\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 观测矩阵设为 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 协方差参

$$\text{数 } \mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} 0.2 & & & \\ & 0.2 & & \\ & & 0.2 & \\ & & & 0.2 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} 0.4 & \\ & 0.4 \end{bmatrix}.$$

在单目标跟踪结果中, 所提方法可以准确跟踪单个飞行目标, 特别地, 目标 3 次机动变化较大时, 跟踪依然稳健, 目标跟踪轨迹与实际运动轨迹基本吻合, 如图 6。与传统卡尔曼滤波方法相比, 本文方法的 RMSE 整体更低; 在跟踪开始阶段, 传统卡尔曼方法的收敛效果不佳, 说明本文方法提高了跟踪准确率, 且利于滤波快速收敛。

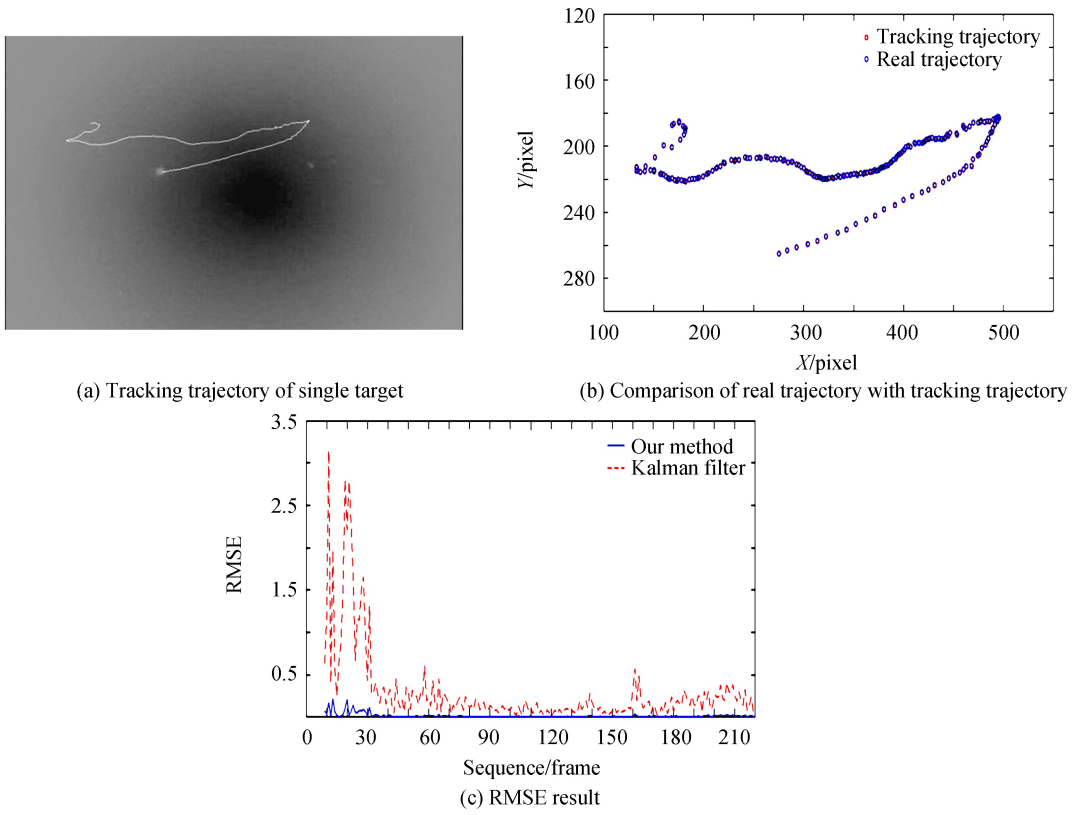


图6 序列一单个目标跟踪结果

Fig.6 Tracking results of single target in sequence 1

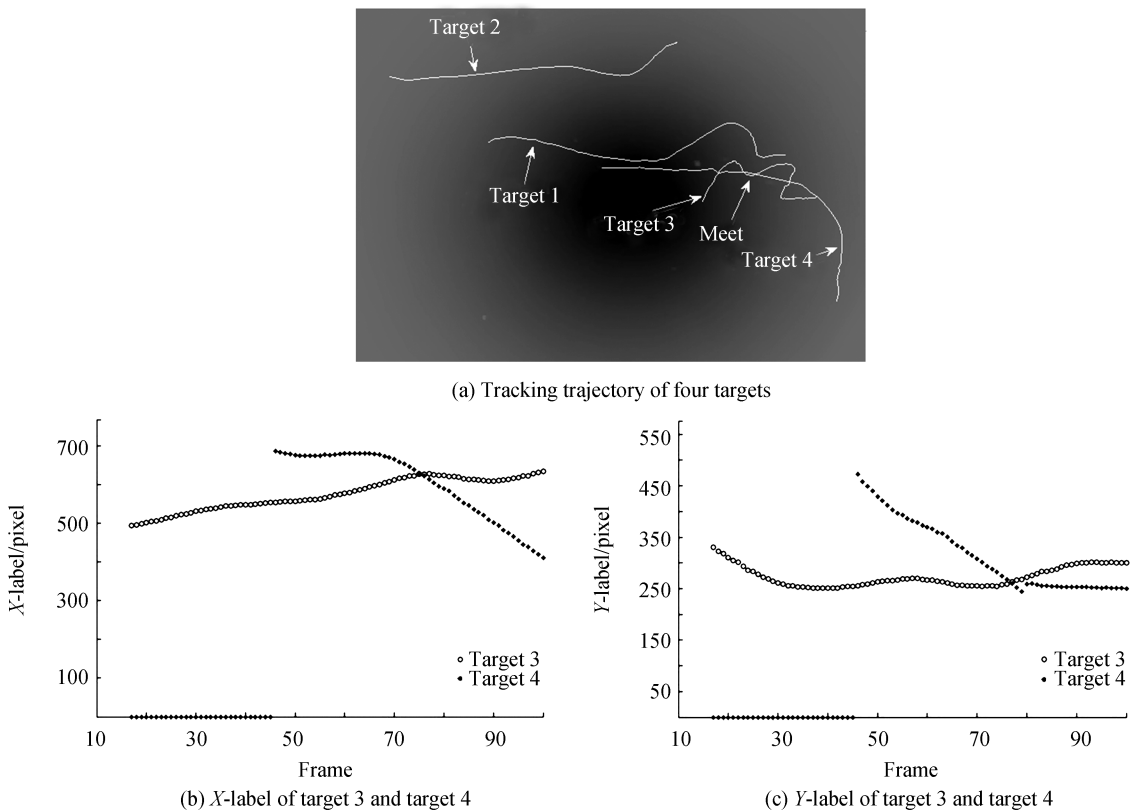


图7 序列二多目标跟踪结果

Fig.7 Tracking results of multiple targets in sequence 2

序列二为 4 个航模目标跟踪实验,共计 200 帧,目标 1 和目标 2 从初始帧出现,目标 3 从 17 帧出现,目标 4 从 46 帧开始出现,目标 3 和目标 4 从第 71 帧到 82 帧相遇,期间二者距离低于安全距离阈值.按照传统卡尔曼滤波的跟踪方法,目标 3 在相遇之后跟踪失败.而通过采用线性路径规划,规避了目标跟踪模型之间的干扰,4 个目标跟踪轨迹如图 7 所示.其中,目标 3 和目标 4 的 X、Y 坐标变化如图 7(b)和(c)所示,虽然目标 4 的 Y 坐标在第 79、80、81 帧中存在一定偏差,但在允许的范围,对跟踪结果基本没有影响.同时,航模目标在视场中不同位置处的形状有所不同.跟踪结果表明:GEWC 模型适用于大视场中不同的小目标和目标本身的形状变化,具有良好的准确性和稳定性.

3.2 视场角 180°

序列三共计 150 帧,为单个空中飞机目标,图像中包含地气系统、探测器非成像区域和天空背景.目标大小约为 8 个像素,机动速度约为 3 像素/帧.按照 2.1 节中的方法,寻找天地分界线、探测深空背景区域,效果如图 8(a)所示,建筑物与天空的轮廓分界明显,效果良好.采用最小化背景抑制模型,寻找目标航迹起始点并予以跟踪,其中卡尔曼滤波参数和 3.1 节相同,如图 8(b)和(c)所示,目标跟踪轨迹和实际运动轨迹基本吻合,效果良好.本文方法和传统卡尔曼滤波跟踪方法的 RMSE 结果如图 8(d)所示,本文方法的 RMSE 更小,收敛速度更快,可良好适用于 180°大视场红外系统中的单目标跟踪,且跟踪准确、稳健.

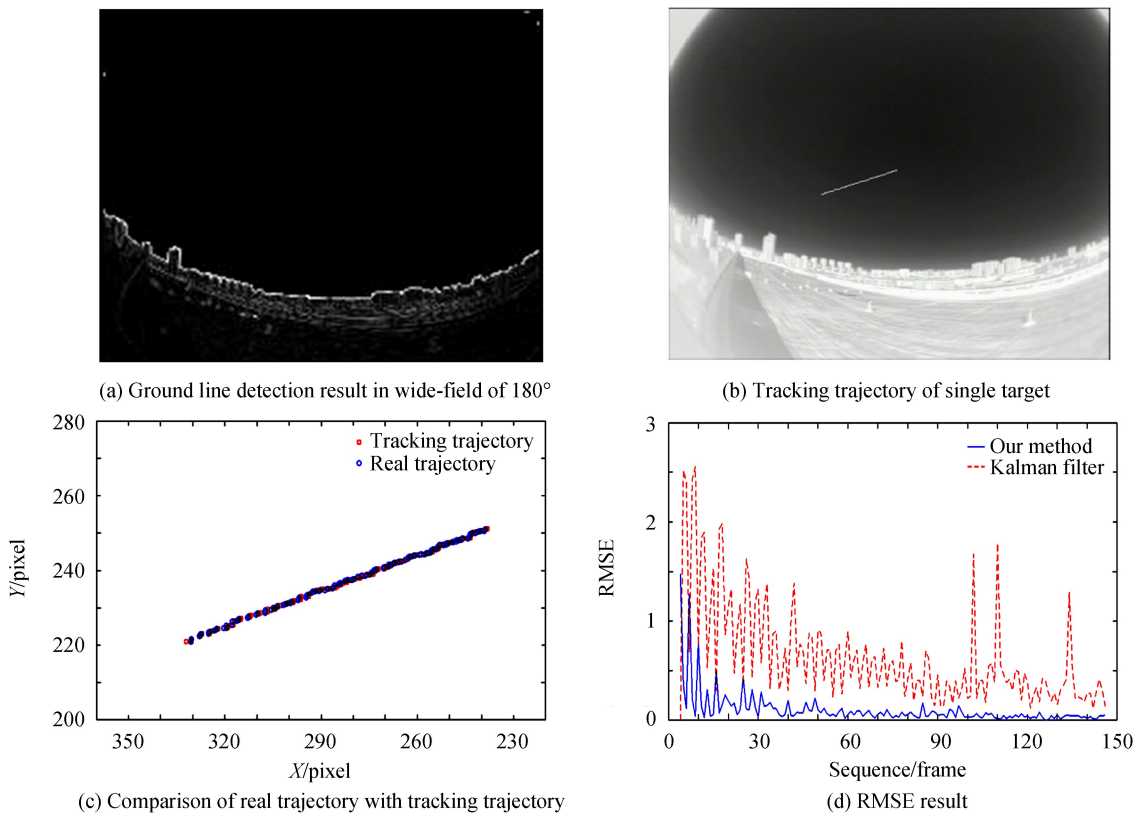


图 8 序列三单目标跟踪结果

Fig.8 Tracking results of single target in sequence 3

序列四共计 190 帧,为某型导弹断续发射,目标 1 从首帧出现并保持飞行状态,目标 2 从第 84 帧出现,背景为天空、地面和探测器非成像区域,图像中存在镜头光晕带来的干扰.本文方法对天空背景进行抑制处理,采用航迹初始点定位方法确定目标 2 的初始位置,根据运动约束条件判断为真目标,并予以跟踪,航迹如图 9 所示,而传统卡尔曼滤波方法难以准确捕捉并跟踪目标 1,目标 2 则完全丢失,说明本文方法在复杂背景条件下仍具有较高的可靠性和准确性.

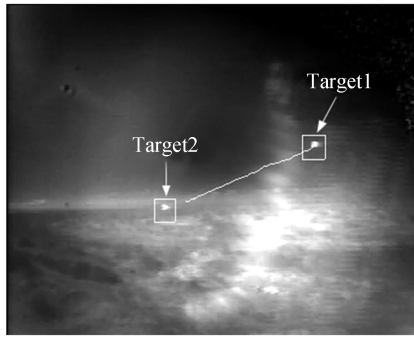


图9 序列四多目标跟踪结果

Fig.9 Tracking result of multiple target in sequence 4

以上四个实验结果表明,卡尔曼滤波模型采用 2×2 维的状态转移矩阵、目标运动模型采用CV模型、GEWC模型质心定位准确,有利于提高收敛速度、减少系统的运算量,提高目标跟踪的时效性.为进一步定量分析所提方法的跟踪性能,引入跟踪耗时和中心定位误差(CLE)两项指标,并与经典 Meanshift、WCF^[15]、CSK^[16]和 MS-PF^[17]进行对比实验,其中,对多目标的中心定位误差进行均值化处理.从图10中可看出:序列一中,由于目标存在三次较大的机动变化,超出了 Meanshift 和 WCF 的搜索范围,出现虚警且在第6帧和第18帧之后跟踪失败.序列二中,在第71帧处,目标3和目标4相遇,由于其特征相似,CSK难以区分、导致跟踪失败;同样地,目标3和目标4的飞行速度超出了 WCF 的搜索范围,跟踪失败.序列三中,虽然目标信号微弱,由于天空背景纯净、目标在大视场背景中的运动速度缓慢,文中所有方法均可以有效跟踪,但本文方法的CLE更小,说明质心定位更为准确、跟踪稳健.序列四中,受镜头光晕和背景噪声的影响,Meanshift和CSK难以区分真实目标,跟踪失败;MS-PF虽整体达到跟踪效果,但其在目标经过光晕边缘时发生了一定的偏移,同时,其对于云层和地面边缘的干扰较为敏感.从表1中可知,本文方法的帧平均处理速度最快,约为对比方法速度的1.5倍,这是因为在大视场中,质心定位准确,提高了本文方法的准确性和实时性;主观视觉和

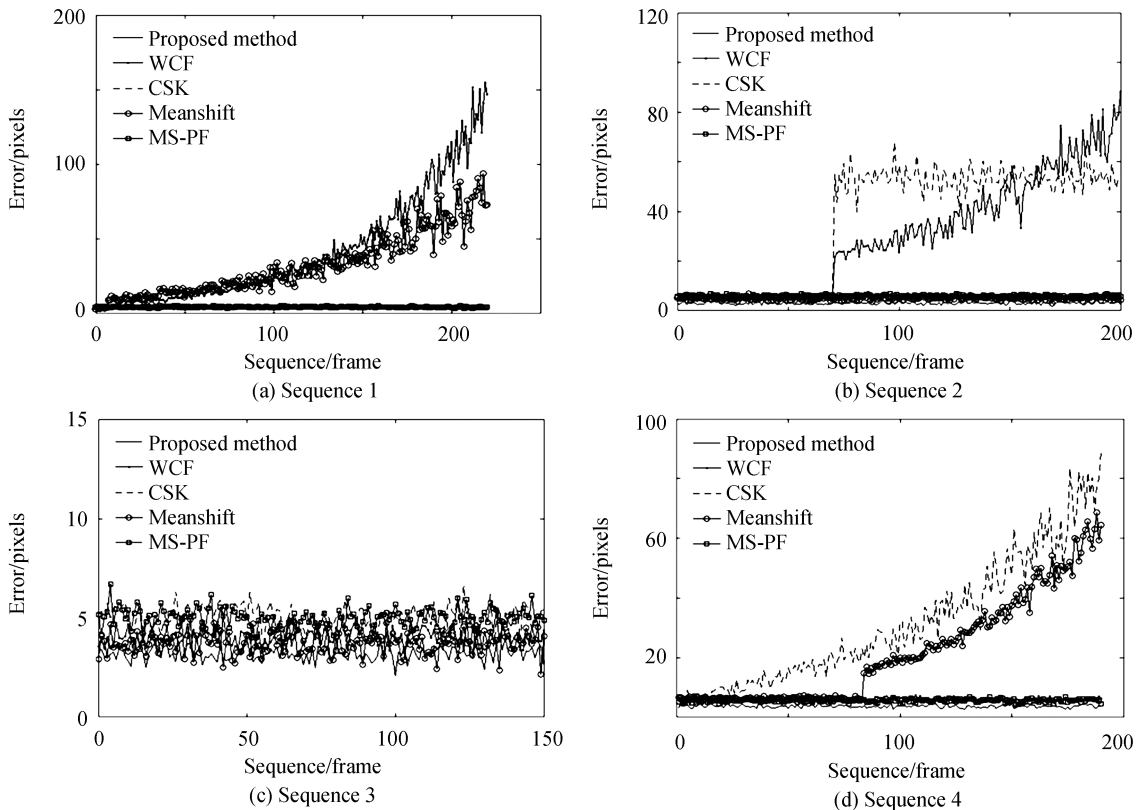


图10 不同方法的跟踪目标中心定位误差结果

Fig.10 Targets center location error results of different methods

客观评价结果也表明:本文的梯度熵权质心定位模型具有更强的适应能力。

表 1 不同方法的帧平均处理时间

Table 1 Average processing time of different methods

	Meanshift	WCF	CSK	MS-PF	Our method
Sequence 1	0.08s	0.12s	0.15s	0.09s	0.06 s
Sequence 2	0.15s	0.18s	0.11s	0.12s	0.10 s
Sequence 3	0.07s	0.06s	0.09s	0.04s	0.05 s
Sequence 4	0.12s	0.14s	0.16s	0.12s	0.09 s
Average	0.105s	0.125s	0.128s	0.092s	0.075 s

4 结论

本文提出了一种基于梯度熵权质心定位模型的卡尔曼多目标跟踪方法,按照天地线检测、背景抑制、航迹初始点检测、预测跟踪的流程,对大视场中的多目标予以跟踪。梯度熵权质心定位模型克服了大视场成像所导致的目标成像畸变、背景非均匀性、弥散等因素的干扰,更为精准地求取了预测窗口中的目标质心,保证了数据关联的连贯性和准确性。同时,利用线性路径规划的方法解决了多目标距离太近造成的模型干扰。在 70° 和 180° 的大视场中进行了实验验证,结果表明:在纯净天空、市区天空、野外天空环境中,与传统跟踪方法相比,本文方法的跟踪结果误差更小、收敛速度更快,平均帧速提高了 1.5 倍,具有良好的鲁棒性和实时性,对实际应用有一定的参考价值。

参考文献

- [1] ZHANG Shuai, LIU Bing-qi, HUANG Fu-yu, *et al.* Super wide field of view staring infrared imaging technology and its application[J]. *Laser and Infrared*, 2016, **46**(10): 1176-1182.
张帅, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 超大视场红外凝视成像技术及其应用浅析[J]. 激光与红外, 2016, **46**(10): 1176-1182.
- [2] HUANG Fu-yu, WANG Yong-zhong, SHEN Xue-ju, *et al.* Analysis of space target detection range based on space-borne fisheye imaging system in deep space background [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, **55**(6): 475-480.
- [3] CHRISTOPHER R B, MARK A M, THOMAS J B. Operational testing and applications of the AIRS FPA with infrared fisheye optics [C]. SPIE, 2003, **4820**: 515-524.
- [4] LUO Huan, YU Lei, LIAO Jun, *et al.* Tracking framework for small infrared multi-target in complex background[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1536-1541.
罗寰, 于雷, 廖俊, 等. 复杂环境下红外弱小多目标跟踪系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1536-1541.
- [5] WANG Gang, CHEN Yong-guang, YANG Suo-chang, *et al.* Robust visual saliency detection method for infrared small target[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, **41**(12): 2309-2318.
王刚, 陈永光, 杨锁昌, 等. 鲁棒的红外小目标视觉显著性检测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, **41**(12): 2309-2318.
- [6] SU Xiu-qin, LIANG Jin-feng, LU Tao, *et al.* IR target detection & tracking algorithm based on sea-sky background[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1309-1312.
苏秀琴, 梁金峰, 陆陶, 等. 海天复杂背景下红外目标的检测跟踪算法[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1309-1312.
- [7] HUANG Fu-yu, SHEN Xue-ju, LIU Xu-min, *et al.* Detection of super wide-field infrared target based on spatial-temporal fusion processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2328-2338.
黄富瑜, 沈学举, 刘旭敏, 等. 基于空时域融合处理检测超大视场红外目标[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(8): 2309-2318.
- [8] BAE T. Spatial and temporal bilateral filter for infrared small target enhancement [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **63**(2): 42-53.
- [9] MIN Chao-bo, ZHANG Jun-ju, CHANG Ben-kang, *et al.* Spatio-temporal segmentation of moving objects using edge features in infrared videos[J]. *Optik*, 2014, **125**(7): 1809-1815.
- [10] ZHANG Shuai, LIU Bing-qi, LI Yong, *et al.* Rapid detection method for infrared weak and small moving target of super wide-field image [J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(8): 693-698.
张帅, 刘秉琦, 李勇, 等. 一种超大视场中红外弱小运动目标的快速检测方法[J]. 红外技术, 2016, **38**(8): 693-698.
- [11] DRUMMOND O E. Signal and data processing of small targets[C]. SPIE, 2014, **9092**: 909201.
- [12] FU Zhao-xia, HAN Yan. Centroid weighted Kalman filter for visual object tracking [J]. *Measurement*, 2012, **45**(4): 650-655.
- [13] ZHENG Hai-chao, MAO Xia, LIANG Xiao-geng. Gray target tracking algorithm based on edge information[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, **41**(12): 2240-2259.

- 郑海超,毛峡,梁晓庚.基于边缘信息的灰度目标跟踪算法[J].北京航空航天大学学报,2015,41(12):2240-2259.
- [14] YAN Shi-hua, HE Yong-qiang, ZHOU Yu-long. Maneuvering target model of the infrared fisheye detecting system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911002.
- 严世华,何永强,周玉龙.基于红外鱼眼探测系统的运动目标模型[J].光学学报,2012,32(9):0911002.
- [15] HE Yu-jie, LI Min, ZHANG Jin-li, *et al.* Infrared target tracking via weighted correlation filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 73: 103-114.
- [16] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.* Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels[C]. ECCV, 2012: 702-715.
- [17] WEI Kun, ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, *et al.* IR target tracking based on mean shift and particle filter[J]. *Journal of Optoelectronics • Lasers*, 2008, 19(2): 213-217.
- 魏坤,赵永强,潘泉,等.基于均值漂移和粒子滤波的红外目标跟踪[J].光电子·激光,2008,19(2):213-217.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 61801507)

引用格式: ZHANG Shuai, LIU Bing-qi, HUANG Fu-yu, *et al.* Gradient Entropy Weighted Centroid Method for Air Target Tracking in Infrared Wide Field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11):1110002

张帅,刘秉琦,黄富瑜,等.大视场红外空中中小目标梯度熵权质心跟踪方法[J].光子学报,2018,47(11):1110002