

# 红外图像中快速小目标的均值移位跟踪

侯晴宇<sup>1,2</sup>, 卞春江<sup>1</sup>, 逯力红<sup>3</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 张晔<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 150001 哈尔滨;

2. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 150001 哈尔滨; 3. 天津工业大学 理学院, 300387 天津)

**摘要:** 为了增强红外图像中快速小目标跟踪的稳健性, 提出基于隶属度加权核直方图目标表征模型的改进均值移位跟踪算法. 首先分析原始均值移位算法跟踪快速小目标的局部背景干扰问题, 融合背景信息提出隶属度加权核直方图目标表征模型. 该模型能够提高对于目标的表征能力, 抑制局部背景干扰. 然后, 以 Bhattacharyya 系数作为相似性度量, 在均值移位框架下推导出基于该模型的移位向量, 能够有效实现目标的移位跟踪. 移位过程中, 目标隶属度大的灰度具有高移位权重, 反之具有低移位权重. 最后, 应用模型更新方法克服局部背景的时变性, 进一步提高目标跟踪的鲁棒性. 实验结果表明, 该算法对于红外图像中的快速小目标的具有稳健的跟踪性能.

**关键词:** 目标跟踪; 红外; 快速小目标; 均值移位

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)04-0079-05

## Mean shift tracking for fast small target in IR imagery

HOU Qingyu<sup>1,2</sup>, BIAN Chunjiang<sup>1</sup>, LU Lihong<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Ye<sup>2</sup>

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

3. School of Science, Tianjin Polytechnic University, 300387 Tianjin, China)

**Abstract:** To enhance the robustness of IR fast small target tracking, an improved mean shift tracking algorithm based on membership degree weighted kernel histogram target representing model is proposed. Firstly, the local background interference problem in tracking fast small target with original mean shift algorithm is analyzed and the membership degree weighted kernel histogram target representing model merged into background information is presented. This model is able to enhance the representing capability of target and suppress local background interference. Then, the shift vector of this model is deduced in the framework of mean shift by regarding Bhattacharyya coefficients as the similarity measure. The target shift tracking is achieved effectively according to target gray level of large membership degree with high shift weight, and vice versa with low shift weight. Finally, the local background time-varying is conquered by employing model updating method and the robustness of target tracking is further improved. The experimental result indicates that the algorithm can improve the shift weight of target pixel gray level and suppress background interference, thus the performance of tracking the IR fast small target is robust.

**Key words:** target tracking; IR; small target; mean shift

目标跟踪是机器视觉领域的研究方向之一, 目标跟踪技术主要通过目标建模、相似性度量建

立、模型匹配 3 个步骤实现<sup>[1-2]</sup>. 实际中应用比较广泛的模型匹配跟踪算法为 Mean-shift (MS) 算法<sup>[3-6]</sup>. 该方法以目标区域的特征核直方图为目标模型, 以 Bhattacharyya 系数为相似性度量, 由梯度匹配搜索原理计算出图像空间中目标中心的位置, 在跟踪成像目标时能表现出良好的性能.

在小目标跟踪领域, MS 算法的应用较少. 文

收稿日期: 2012-07-02.

作者简介: 侯晴宇(1982—), 男, 博士, 助理研究员;

张伟(1962—), 男, 教授, 博士生导师;

张晔(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 侯晴宇, houqingyu@126.com.

献[7]针对 FLIR 平台下红外小目标的跟踪问题,提出了采用像素灰度和局部标准差二维特征对目标进行核直方图描述,利用二维核描述空域中目标的密度分布,一维核用作特征直方图的加权因子,在 MS 框架下实现目标跟踪.文献[8]与文献[7]的原理基本相同,只是将目标灰度与局部加权灰度信息熵作为特征建立核直方图模型,通过 MS 算法实现目标跟踪.文献[9]利用核直方图插值的方法解决了小目标跟踪中 MS 算法权值计算中除以零的问题,以及其所导致的跟踪失败问题.虽然这些算法能够在一定程度上解决小目标的 MS 跟踪问题,但是,在跟踪图像中快速运动的小目标时,这些算法存在性能缺陷.

本文首先对快速运动小目标的 MS 跟踪进行了分析,然后针对跟踪性能下降问题提出了隶属度加权目标表征模型,最后基于此模型进行了均值移位向量的推导.应用该算法对实测的红外图像中的快速运动小目标进行了跟踪试验,证明了算法的有效性.

## 1 问题分析

如图1所示,  $\{p_u(\mathbf{z}_{k-1})\}$  为第  $k-1$  帧图像中以目标定位点  $\mathbf{z}_{k-1}$  为核心,核窗宽度为  $h$  的核直方图,其中  $u$  为灰度量级;  $\{p'_u(\mathbf{z}_{k-1})\}$  为第  $k$  帧图像中以  $\mathbf{z}_{k-1}$  为核心,核窗宽度为  $h$  的核直方图.

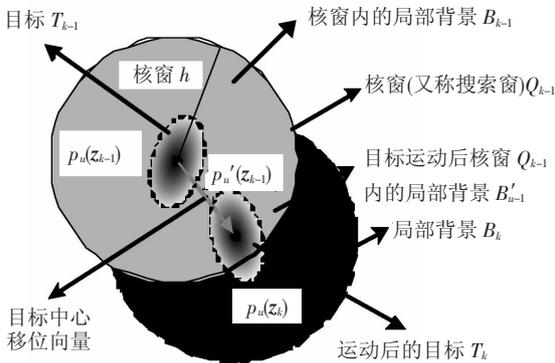


图1 第  $k-1$  帧与第  $k$  帧图像中目标的移位过程及相应的参数定义

Mean-shift 跟踪是以 Bhattacharyya 系数为相似性度量,利用均值移位算法在空间域通过梯度搜索寻找最优的  $\mathbf{z}_k$ ,使得第  $k$  帧图像中目标定位点  $\mathbf{z}_k$  处的核直方图  $\{p_u(\mathbf{z}_k)\}_{u \in \{1, \dots, m\}}$  与  $\{p_u(\mathbf{z}_{k-1})\}_{u \in \{1, \dots, m\}}$  相似度最大,目标发生运动后由均值移位原理得到的核窗  $Q_{k-1}$  中像素的移位权重为

$$w_i^{Q_{k-1}} = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{p_u(\mathbf{z}_{k-1})}{p'_u(\mathbf{z}_{k-1})}} \delta[b(\mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}) - u]. \quad (1)$$

式中:  $b(\mathbf{x})_i^{Q_{k-1}}$  为目标运动后核窗  $Q_{k-1}$  内像素点

$\mathbf{x}_i$  处的像素值,  $\delta(\mathbf{x})$  是 Delta 函数.

在快速小目标跟踪过程中,式(1)存在两个问题:1) 目标运动过程中,必须采用一定尺度的核窗  $Q_{k-1}$  (较大的  $h$ ) 覆盖目标的运动范围.此时核窗  $Q_{k-1}$  内目标像素所占比例较小,背景像素所占比例较大,背景像素的移位占优,干扰了目标像素的移位,易造成跟踪失败;2) 红外图像中存在较强的空间非均匀性剩余噪声以及时序噪声<sup>[10]</sup>,造成了小目标帧间灰度的非稳定,易使得  $T_{k-1}$  中目标像素的灰度对应的核直方图  $\{p_u(\mathbf{z}_{k-1})\}_{u \in \{1, \dots, m\}}$  为零值,即核窗  $Q_{k-1}$  内的目标像素的移位权重  $w_i^{Q_{k-1}}$  ( $i$  为核窗内的像素序号) 为零,不能对目标像素进行有效移位,易造成跟踪失败.

从上述分析可以看出,红外图像中快速小目标均值移位易造成跟踪失败的原因是目标像素移位权重相对较小.但是,本质上的原因,目标模型中包含了很大比例的局部背景灰度成分,将此模型作为模板进行目标搜索匹配容易受到背景的干扰,算法易错误收敛.因此,解决这个问题需要从目标建模的角度出发,提高模型对于目标的表征能力,抑制背景干扰.

## 2 改进的均值移位跟踪算法

### 2.1 隶属度加权核直方图表征模型

设第  $k-1$  帧中目标的隶属度加权核直方图模型为

$$\hat{p}_u(\mathbf{z}_{k-1}) = C_{|\hat{p}_u(\mathbf{z}_{k-1})|} L_{z_{k-1}}(u) p_u(\mathbf{z}_{k-1}). \quad (2)$$

式中:  $p_u(\mathbf{z}_{k-1}) = C_{|p_u(\mathbf{z}_{k-1})|} \sum_i k_2(\mathbf{z}_{k-1} - \mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}) k_1[b(\mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}) - u]$ ,  $k_2(\mathbf{x})$ ,  $k_1(x)$  分别为二维、一维 Epanechnikov 核函数<sup>[7]</sup>.

$$k_2(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{2}{\pi h_2^2} (h_2^2 - \mathbf{x}^T \mathbf{x}), & \mathbf{x}^T \mathbf{x} < h_2^2; \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

$$k_1(x) = \begin{cases} \frac{3}{4\pi h_1^3} (h_1^2 - x^2), & x^2 < h_1^2; \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

$b(\mathbf{x}_i^{Q_{k-1}})$  为像素  $\mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}$  的灰度,  $u$  为灰度的量化等级;  $C_{|p_u(\mathbf{z}_{k-1})|}$  为常量系数,使得  $\sum_u p_u(\mathbf{z}_{k-1}) = 1$ ;

$C_{|\hat{p}_u(\mathbf{z}_{k-1})|}$  为常量系数,使得  $\sum_u \hat{p}_u(\mathbf{z}_{k-1}) = 1$ ;  $L_{z_{k-1}}(u)$  表征了  $u$  属于目标的隶属度,  $L_{z_{k-1}}(u)$  的定义为

$$L_{z_{k-1}}(u) = 1/G_{z_{k-1}}(u). \quad (3)$$

式中:  $G_{z_{k-1}}(u)$  表示在局部背景区域  $\Omega_{bg}^{Q_{k-1}}$  中灰度的高斯概率密度函数,其中均值和均方差利用

$\Omega_{bg}^{Q_{k-1}}$  区域内的灰度统计计算得到, 参数定义如图 2 所示. 参考帧中目标区域由手动确定, 如图 2 中的圆虚框所示, 核窗内除目标区域以外的区域即为局部背景区域.

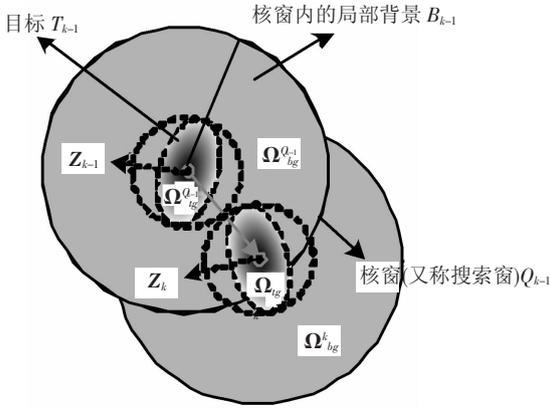


图 2 隶属度加权目标表征模型的相关参数

隶属度  $L_{z_{k-1}}(u)$  表征了灰度  $u$  属于目标的可能性, 与局部背景相比, 目标中概率大的灰度隶属度大, 而局部背景中概率大的灰度隶属度值小. 将其融入到核直方图模型中, 提高了目标中特有的灰度成分对于核直方图的贡献, 进而提高了模型对于目标的表征能力, 有利于跟踪中的模式匹配.

### 2.2 均值移位跟踪

当目标运动后, 设该候选目标区域中心位置为  $z$ , 则候选目标区域的隶属度加权核直方图模型为

$$\hat{p}_u(z) = C_{|\hat{p}_u(z)|} L_z(u) p_u(z).$$

最大化 Bhattacharyya 系数度量  $\rho(z)$  可实现在第  $k$  帧中找到与目标模型  $\hat{p}_u(z_{k-1})$  最为相似的图像区域, 即  $z_k = \underset{z}{\operatorname{argmax}} \rho(z)$ , 其中  $\rho(z) = \sum_u \sqrt{\hat{p}_u(z_{k-1}) \hat{p}_u(z)}$ . 通常, 第  $k$  帧中的目标搜索从  $k-1$  帧中的目标位置  $z_{k-1}$  处开始. 因此以  $z_{k-1}$  为中心的候选目标区域的模型  $\hat{p}_u(z_{k-1})$  应当被先计算出来. 对  $\rho(z)$  利用泰勒级数在  $\hat{p}_u(z_{k-1})$  处展开并略去高次项有

$$\rho(z) \approx \frac{1}{2} \sum_u \sqrt{\hat{p}_u(z_{k-1}) \hat{p}'_u(z_{k-1})} + \frac{1}{2} \sum_u \hat{p}_u(z) \sqrt{\hat{p}_u(z_{k-1}) / \hat{p}'_u(z_{k-1})}.$$

此时, 可得

$$\rho(z) \approx \frac{1}{2} \sum_u \sqrt{\hat{p}_u(z_{k-1}) \hat{p}'_u(z_{k-1})} + \frac{C_{|\hat{p}_u(z)|}}{2} \sqrt{C_{|\hat{p}_u(z_{k-1})|}} \sum_i w_i k_2(z - \mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}), \quad (4)$$

$$w_i = \sum_u \sqrt{L_{z_{k-1}}(u) L_z(u)} \sqrt{\frac{p_u(z_{k-1})}{p'_u(z_{k-1})}} k_1[b(\mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}) - u]. \quad (5)$$

因为在连续帧间目标位置处的局部背景变化较小, 因此有理由假设帧间满足  $L_{z_{k-1}}(u) \approx L_z(u)$ , 则式 (5) 转化为

$$w_i = \sum_u L_{z_{k-1}}(u) \sqrt{\frac{p_u(z_{k-1})}{p'_u(z_{k-1})}} k_1[b(\mathbf{x}_i^{Q_{k-1}}) - u]. \quad (6)$$

由于式 (4) 中第 1 个子项和  $z$  无关, 所以为了最大化  $\rho(z)$ , 式 (4) 中第 2 个子项应当被最大化. 注意, 第 2 个子项是在  $k-1$  帧目标位置处利用加权的核函数估算的概率密度, 这个概率密度的极值问题可以用 Mean-Shift 理论求得, 即在匹配过程中利用下式将核函数中心从当前帧初始位置  $z_{k-1}$  不断移动到新的位置  $z'$  处, 直至达到移位收敛条件, 即完成均值移位跟踪.

$$z' = \sum_i (z_i w_i) / \sum_i w_i$$

上述均值移位过程中, 隶属度  $L_{z_{k-1}}(u)$  越大, 则  $\hat{p}_u(z_{k-1})$  越大, 则灰度  $u$  对于 Bhattacharyya 系数的贡献就越大, 即灰度为  $u$  的像素的移位越能够表征目标的移动, 这点从式 (6) 也可以看出, 候选目标区域中灰度的移位权重是原始均值移位算法得到的移位权重和灰度隶属度的乘积. 在移位过程中对于属于目标可能性大的灰度给予高移位权重, 而对于属于局部背景可能性大的灰度给予低移位权重, 这样就会在一定程度上抑制背景干扰, 提高小目标跟踪的稳健性.

### 2.3 模型更新

由于待跟踪目标的局部背景存在时变性, 使得在参考帧确定的目标模型不可能在整个序列上都很好地刻画待跟踪的目标. 因此在跟踪过程中, 必须进行目标模型的更新, 以此增强目标跟踪的自适应性能. 目标模型更新的原理是利用本帧跟踪得到目标位置及参考帧中手动确定的目标尺度信息 (见图 2 中圆虚框) 计算隶属度加权表征模型作为目标模型, 用于下一帧目标的跟踪.

## 3 算法验证实验

为了验证所提出的算法在实测红外序列图像上的小目标跟踪性能, 利用  $160 \times 120$  非制冷微测辐射热计进行了云背景下的红外小目标视频采集, 该热像仪的帧频为 25 帧/s, 采集帧数 40 帧. 目标平均尺寸为  $6 \times 6$ , 目标平均帧间移动约 10 个像素.

### 3.1 算法验证实验 1

图 3 为连续两帧目标图像的放大图像, 两个圆框内分别为选定的目标与局部背景. 由于红外图像中的小目标的边界较为模糊, 因此在实际操作过程中往往将目标区域选择略大于实际的目标尺寸, 这

样既没有影响到局部背景的统计特性,又很大程度地保留了目标的特征信息.在本文实验中目标区域(小圆框)半径选择为 4,核窗(大圆框)半径选择为 10.利用图 3(a)计算得到的目标的原始核直方图及隶属度加权核直方图如图 4 所示.从图中可以看出,原始核直方图不连续,存在很多零值点.而改进后的隶属度加权核直方图具有较好的连续性,能够解决小目标帧间灰度非稳定造成的跟踪失败问题.

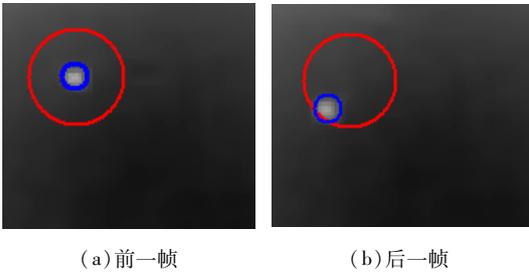


图 3 连续两帧图像的局部放大图像

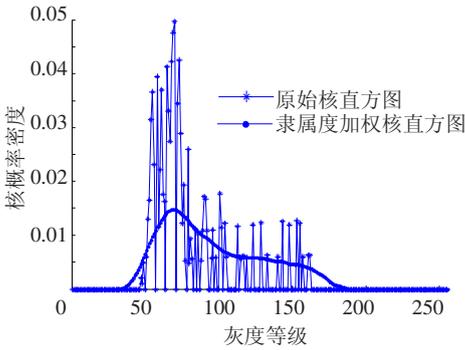


图 4 目标的核直方图

以图 3(a)作为参考帧,以大圆框作为核窗,计算原始核直方图模型,图 5(a)为依据该模型的均值移位算法得到的图 3(b)中大圆框区域对应的移位权重图像.同理,以图 3(a)中小圆框作为目标区域,大圆框作为核窗,依据本文目标模型的构建方法,计算隶属度加权核直方图模型,图 5(b)为依据该模型的均值移位算法得到的移位权重图像.从图中看出,隶属度加权核直方图模型下的移位跟踪能够有效提高目标像素的移位权重,抑制背景干扰.

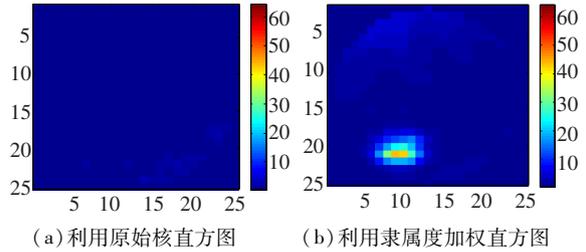


图 5 利用两种核直方图计算得到的移位权重图像

### 3.2 算法验证实验 2

图 6 给出了利用本文算法及文献[3,7]中的算法对红外视频中的目标进行跟踪的结果,其中以第 4 帧作为参考帧,计算目标模型,利用算法进行模型匹配实现后续帧中的目标跟踪.小圆框为本文算法的跟踪结果(大圆框显示了目标邻域的局部背景区域),方形框及菱形框为文献[3,7]中算法的跟踪结果.从跟踪结果看出,本文算法对快速小目标具有较好的跟踪性能.

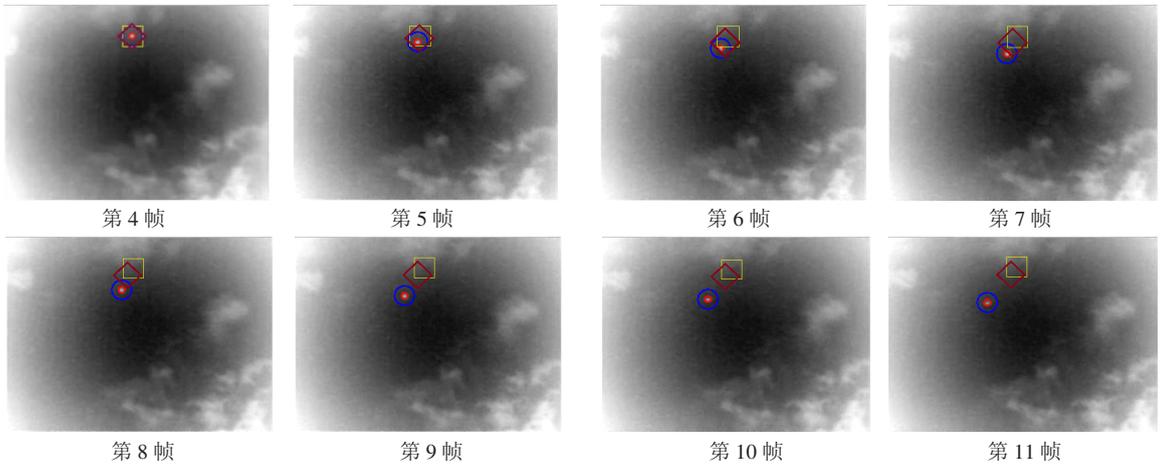


图 6 利用本文算法及文献[3,7]算法对连续帧快速小目标的跟踪结果

### 3.3 算法验证实验 3

为了进一步验证本文算法在跟踪快速小目标上的性能,利用本文算法对红外视频中的目标进行隔帧跟踪,即进一步提高目标在图像中的移动速度.算法中采用两倍于实验 2 中的核窗半径,图 7 给出了跟踪结果.图 8 给出了序列帧中跟踪得

到的目标位置处的隶属度加权核直方图模型与目标模型之间的 Bhattacharyya 系数,从图中可以看出该系数大于 0.95,并且目标跟踪成功,说明本文提出的模型更新方法在局部背景发生变化时具有较强的自适应性能,同时也证明了本文算法的鲁棒性.

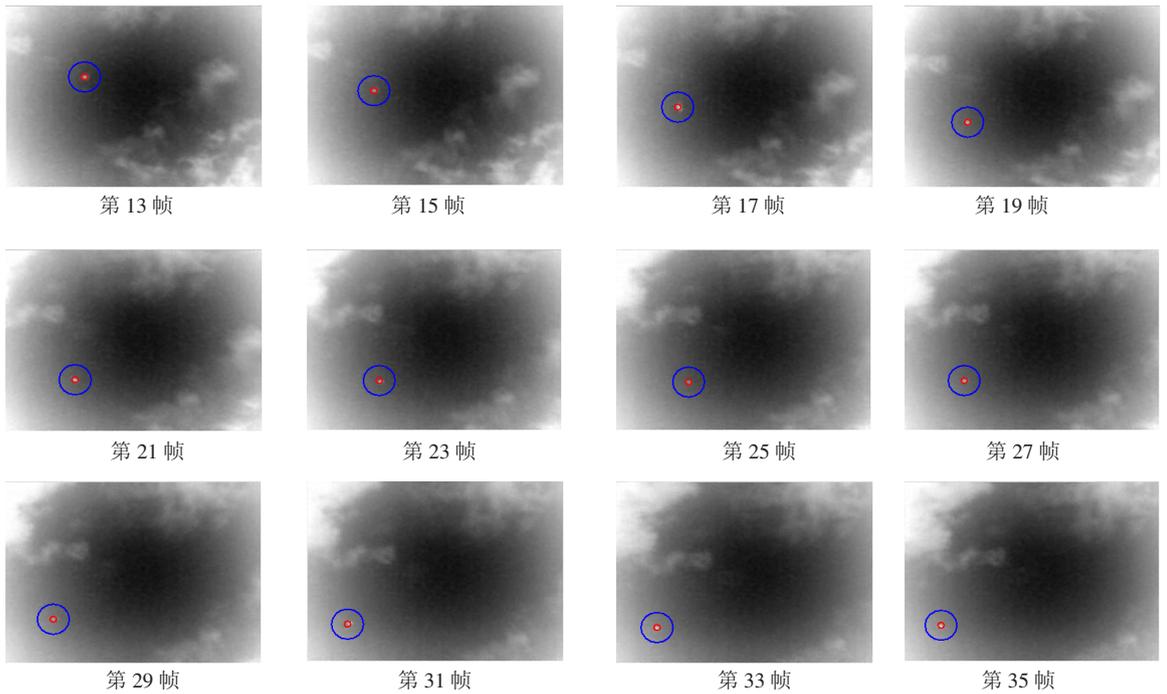


图7 利用本文方法的快速小目标隔帧跟踪结果

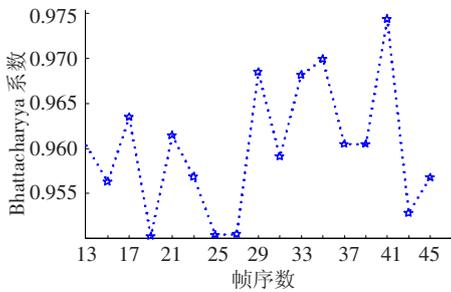


图8 跟踪过程中的 Bhattacharyya 系数

## 4 结 论

1) 针对红外图像中快速运动小目标的跟踪问题,提出了隶属度加权核直方图目标表征模型,该模型能够提高对于目标的表征能力,有利于目标跟踪中的模型匹配。

2) 基于隶属度加权核直方图目标表征模型,提出了改进的均值移位目标跟踪算法. 该算法能够提高目标像素灰度的移位权重,抑制背景干扰,有利于目标跟踪性能的提升。

3) 利用实测红外图像序列进行了算法仿真实验,结果表明该算法对于红外图像中的快速小目标具有稳健的跟踪性能。

## 参 考 文 献

[1] 姚红革, 雷松泽, 齐华, 等. 基于自适应粒子滤波的红外目标跟踪[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1507 - 1511.

[2] 侯晴宇, 武春风, 逮力红, 等. 成像目标跟踪目标建

模技术综述[J]. 光学技术, 2011, 37(2): 188 - 193.

- [3] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564 - 577.
- [4] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift [C]// Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island: IEEE, 2000: 142 - 149.
- [5] 程建, 杨杰. 一种基于均值移位的红外目标跟踪新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(3): 231 - 235.
- [6] 周斌, 王军政, 沈伟. 基于组合带宽均值迁移的快速目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2297 - 2305.
- [7] YILMAZ A, SHAFIQUE K, SHAH M. Target tracking in airborne forward looking infrared imagery[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(7): 623 - 635.
- [8] 魏长安, 姜守达, 孙超. 基于核密度估计的前视红外小目标跟踪[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(7): 763 - 767.
- [9] 陈建军, 安国成, 张索非, 等. 基于直方图插值的均值移动小尺寸目标跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2119 - 2125.
- [10] D'AGOSTINO J A, WEBB C M. Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise [C]// Proceedings of SPIE: the International Society for Optical Engineering. Orlando: SPIE, 1991: 110 - 121.

(编辑 魏希柱)