

## 鲁棒的前视红外目标多核跟踪算法

苏娟, 杨小冈, 卢俊

(第二炮兵工程大学 907 教研室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 针对前视红外目标跟踪中常见的目标位置偏差和部分遮挡问题, 在均值漂移算法的框架下, 提出了一种基于投影直方图匹配和拓扑约束的多核跟踪算法。首先, 对前后帧图像进行基于空间-灰度二维投影直方图匹配的目标位置预测; 然后, 充分利用目标的前景和背景信息构建多个独立的核跟踪器; 最后, 采用拓扑约束选取跟踪性能好的核跟踪器, 组合得到最终的跟踪结果。实验结果表明: 此算法能对目标进行准确跟踪, 对目标位置偏差和部分遮挡具有较好的鲁棒性, 在有遮挡的情况下, 平均跟踪误差远小于传统的跟踪算法。因此, 该算法在前视红外成像制导中具有较好的实用性和可行性。

**关键词:** 均值漂移; 多核跟踪; 拓扑约束; 投影直方图; 目标模型

**中图分类号:** TP391   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0543-06

## Robust multi-kernel tracking algorithm for FLIR target

Su Juan, Yang Xiaogang, Lu Jun

(907 Section, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** A multi-kernel tracking algorithm based on projection histogram matching and topology constraint was proposed in the mean shift framework, in order to overcome problems caused by partial occlusions and location deviation in the forward looking infrared (FLIR) target tracking. Firstly, target location was predicted by matching the spatio-intensity 2D projection histograms of consecutive frames. Secondly, multiple independent kernel-based trackers were built utilizing the target foreground and background information, which could improve the discrimination of the target model. Finally, topology constraint was used to optimize multiple tracking results, and those trackers with better performance were chosen to generate the final tracking result. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm can track target accurately and robustly, and especially in the cases of partial occlusions or location deviation, the average tracking error of the proposed algorithm is much less than that of the traditional algorithm. Therefore, the algorithm has high practicality and feasibility in the FLIR imaging guidance.

**Key words:** mean shift; multi-kernel tracking; topology constraint; projection histogram; target model

收稿日期: 2012-06-05; 修订日期: 2012-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61072141); 中国博士后科学基金(20100471768, 201104752)

作者简介: 苏娟(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事遥感图像处理和目标识别方面的研究。Email: suj04@mails.tsinghua.edu.cn

## 0 引言

前视红外目标跟踪是红外匹配制导的重要研究内容,在精导武器导航领域中有着重要应用<sup>[1-2]</sup>。在前视红外目标跟踪中,存在两个常见问题:第一,飞行器的机动或较低的采样帧率都有可能使前后帧观测图像中目标位置产生较大偏差;第二,烟雾粉尘等物体可能对目标造成部分随机遮挡,使得观测图像中目标的形状和纹理等特征发生较大变化。上述问题的存在严重影响了目标跟踪的精度。

核跟踪由于其简单易用和实时性好的特点,在红外目标跟踪中得到了广泛的应用。该方法采用直方图表示目标,采用 Bhattacharyya 系数度量目标和候选目标的相似性,通过优化算法迭代得到均值漂移形式的目标位置向量<sup>[3]</sup>。但是,核跟踪不能处理快速运动,也不具备自恢复能力。从核跟踪算法中基于均值漂移的迭代公式可以得出以下结论<sup>[4]</sup>:均值漂移算法的最大迭代步长为目标尺度的一半,当两帧视频中目标实际所在的图像块之间有一定重合时,才可以用核跟踪方法实现对目标位置的准确跟踪。但是,在前视红外目标跟踪中,上述条件有时可能不能得到满足。当前后帧图像中目标位置产生较大偏差时,目标可能跳出跟踪窗口,从而导致跟踪失败。所以,如何消除这些位置偏差的影响是人们关注的一个问题。参考文献[5]在粒子滤波的框架下,提出建立目标的运动模型,需要根据之前的视频帧中目标的位置估计目标运动的速度。参考文献[6]根据原始图像的 Gabor 响应计算光流,然后求解前后帧间的变换模型。参考文献[7]提出采用遥测数据估计载体的位置,预测目标可能出现的区域,在此区域内进行目标检测,以此实现运动补偿。

原始的核跟踪算法将目标视为整体,采用核直方图对目标进行建模,由于直方图模型丢掉了空间信息,降低了目标模型的鉴别性,当产生部分遮挡的时候不能对目标进行准确的定位。为了融入空间信息,并同时能够处理遮挡情况,近年来国内外学者对原始核跟踪方法进行了改进。参考文献[8]提出了基于分段的跟踪算法,将目标表示为多个图像子块,每个子块通过比较相应的直方图对目标的可能位置和尺度进行投票,最终通过组合多个投票图来处理部分遮挡问

题。参考文献[9]提出基于 Grabcut 的目标分块方法,在目标与候选目标的相似性度量函数的设计中,对不同的图像子块赋予不同权重,推导了类 Mean shift 迭代跟踪算法。参考文献[10]将目标分为多个子块,对每个子块提取核函数加权的梯度方向直方图特征,构建了基于梯度方向直方图表示和 Bhattacharyya 系数相似性度量的多核跟踪算法。上述文献采用了不同的目标分块方法,但都只是对目标区域进行分块,没有考虑目标所处的背景区域信息。在前视红外匹配制导等应用场合(运动成像仪对地面固定目标成像),目标的背景区域不发生变化,因此,可以利用目标所处背景区域信息来构建目标模型,以增加目标模型的可鉴别性。且在目标发生遮挡的情况下,遮挡部分所在的核跟踪器的跟踪结果必然是不可靠的,因此,需要采取相应的策略对多个核跟踪器的跟踪结果进行选取和组合,以得到最终跟踪结果。

因此,文中针对前视红外目标跟踪的具体应用,提出了一种基于拓扑约束的多核跟踪算法,以解决目标位置偏差和部分遮挡对目标跟踪精度的影响问题。算法主要包括 3 部分:多核跟踪器的构建,基于投影直方图匹配的目标位置预测和基于拓扑约束的跟踪结果组合。算法框图如图 1 所示。

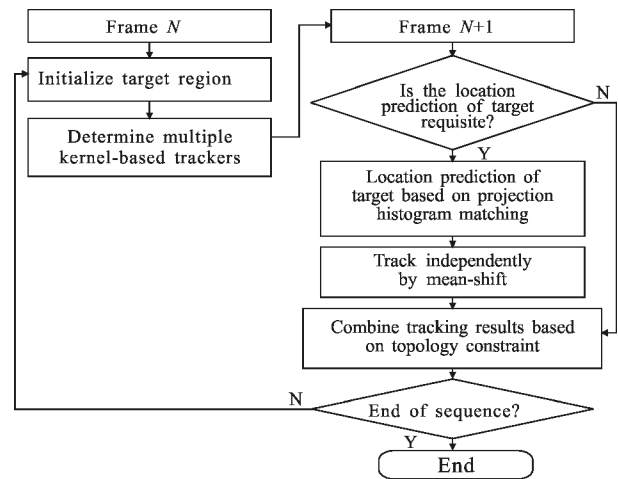


图 1 文中算法框图

Fig.1 Flowchart of the proposed algorithm

## 1 构建多核跟踪器

文中算法的跟踪对象主要是前视红外图像中的典型人造目标,红外成像主要反映物体的热辐射差异,因此,对于建筑物或冷却塔等典型人造目标,其

红外图像一般具有以下特点:目标区域的亮度比背景区域的亮度高,并且具有比较稳定的纹理结构,这一特点导致目标区域与其背景区域在灰度和纹理等特征方面存在较大差异,这种差异本身就包含着很丰富的目标鉴别信息,可以用来构建目标模型。因此,文中构建多核跟踪器的思路是,对目标及其背景区域进行分块,对每个图像子块分别运用一个核跟踪器,由此得到多核跟踪器。

如图 2 所示,文中算法选用 4 个独立的核跟踪器,在初始选定待跟踪目标(如图 2(a)中的白色方框)以后,确定目标区域 4 条边界的中点,并以此为中心,分别确定 4 个核跟踪器的初始目标区域,该初始目标区域与待跟踪目标区域尺寸相同。图 2(b)给出了其中两个核跟踪器(左、上)的初始目标区域。这种多核跟踪器构建方案的特点在于:第一,每个核跟踪器的目标区域由待跟踪目标的部分前景区域和背景区域组成,充分利用了目标所处的背景信息,这在背景不发生变化或变化缓慢的情况下是很有效的;第二,这种多核跟踪器构建方案简单可行,通用性好,适用于各种不同类型的典型目标跟踪的情形。

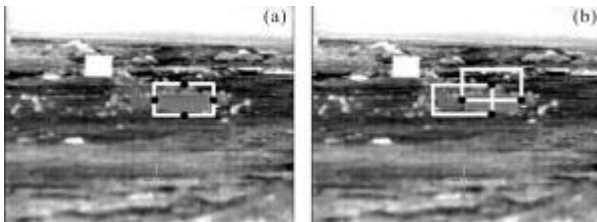


图 2 多核跟踪器的构建

Fig.2 Construction of multi-kernel trackers

在核跟踪的框架下,目标模型和候选目标模型分别表示如下:

$$\hat{q}_u = C \sum_{i=1}^n k(\|x_i^* - u\|) \delta[b(x_i^*) - u] \quad (1)$$

$$\hat{p}_u(y) = C_n \sum_{i=1}^{n_h} k\left(\left\|\frac{y - x_i}{h}\right\|\right) \delta[b(x_i) - u] \quad (2)$$

式中: $u=(1, 2, \dots, m)$ ;  $x_i^*$  表示目标区域内的像素;  $x_i$  表示中心为  $y$  的候选目标区域内的像素;  $k$  表示空间加权的核函数;  $b(x_i)$  为位置  $x_i$  处的像素对应的直方图区间。

核跟踪算法中常采用灰度直方图构建目标模型,但灰度特征易受图像噪声或灰度变化的影响,而纹理特征具有对灰度变化不敏感的特点,可以获得

更为鲁棒的目标描述,实现更为稳定的目标跟踪。因此,为提高目标模型的可鉴别性,文中选用灰度和纹理的联合直方图对目标进行描述,其中纹理特征选用 LBP 特征<sup>[11]</sup>。LBP 特征是一种有效的纹理描述方法,通过比较图像中每个像素与其邻域内像素灰度值的大小,并利用二进制模式表示的比较结果来描述图像的纹理。与其他纹理表示方法相比,LBP 纹理特征计算简单迅速,容易满足视频跟踪的实时性要求,并且通过相应的尺度及循环操作,可以获得具有旋转不变性与尺度不变性的 LBP 特征。

## 2 目标位置预测

文中通过计算并匹配图像的投影直方图实现目标位置预测,目的在于消除前后帧图像间目标可能存在的较大位置偏差,为核跟踪提供更为准确的初始跟踪位置。在前视红外匹配制导中,由于飞行器的机动导致目标在前后帧图像中存在较大位置偏差的情况只出现在个别帧,不是所有视频帧都需要进行目标位置预测,因此,文中加入一个判断是否需要位置预测的环节。其基本思想是,将上一帧图像中的目标区域映射到当前帧图像中,得到一个图像子块,并以此为基准,根据均值漂移算法对迭代步长的要求,以目标尺度的一半为位移,得到 8 个方向上的图像子块(分别是上、下、左、右、左上、右上、左下、右下)。计算这 9 个图像子块与上一帧图像的目标区域的相似性系数(文中采用基于灰度和纹理的联合直方图的 Bhattacharyya 系数),如果最大的相似性系数小于给定的阈值,则认为需要进行目标位置预测。

投影直方图的计算方法如下所述。如图 3 所示,在原始图像的列方向和行方向( $x$  和  $y$ ),分别计算其空间-灰度的二维投影直方图。假定原始图像的尺寸为  $N_x$  和  $N_y$ ,将图像在  $x$  方向上分为  $B_x$  个 bin,在  $y$  方向上分为  $B_y$  个 bin,实现对原始图像的空间划分。在此基础上,将图像灰度分为  $B_g$  个 bin,分别对每个空间划分统计其灰度直方图,由此得到原始图像的空间-灰度二维投影直方图  $H_x$  和  $H_y$ ,其中  $H_x$  的维数为  $B_x \times B_g$ ,  $H_y$  的维数为  $B_y \times B_g$ 。由于文中处理的红外图像尺寸为  $320 \times 240$ ,灰度等级为 256,因此,文中预设  $B_x=40$ ,  $B_y=30$ ,  $B_g=32$ 。

一维灰度直方图只反映了图像的灰度信息,空

间-灰度二维投影直方图克服了灰度直方图的固有缺陷,将图像的空间信息与灰度信息结合起来,有效地提高了直方图对图像的特征能力。

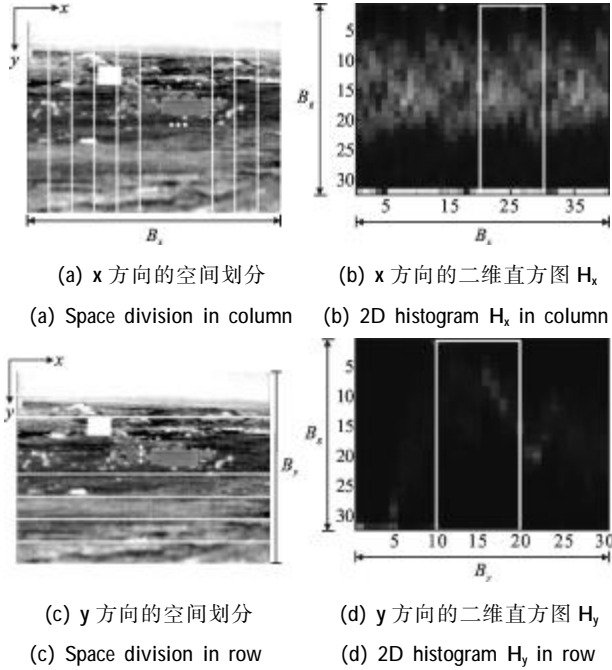


图 3 空间-灰度投影直方图

Fig.3 Spatio-intensity projection histogram

文中采用相关匹配法计算前后帧图像之间在  $x$  方向和  $y$  方向上的偏移量,具体步骤如下:

- (1) 分别计算前后两帧图像在  $x$  方向和  $y$  方向上的空间-灰度二维投影直方图。
- (2) 根据前帧图像中目标所在位置,确定目标在投影直方图中的相应位置,选取投影直方图中包含该段区间的直方图片段作为基准图,如图 3(b)和(d)中的白色方框;
- (3) 在后帧图像的投影直方图中,从左至右遍历整个直方图,计算相应的直方图片段与基准图的相关系数值;
- (4) 根据相关系数最大值计算所对应的  $x$  方向和  $y$  方向的偏移量。

在得到前后帧图像的偏移量后,在后帧图像中,对前帧的目标位置(即后帧的目标初始位置)进行相应的偏移,得到更加准确的目标初始位置,从而消除前后帧图像中目标的主要位置偏差。

### 3 拓扑约束

在目标位置预测的基础上,每个核跟踪器独立

对各自的目标区域进行跟踪。采用核跟踪常用的 Bhattacharyya 系数作为度量目标区域和候选目标区域两个特征向量相似性的测度,即:

$$\hat{\rho}(y) = \rho[\hat{p}(y), \hat{q}] = \sum_{u=1}^m \sqrt{\hat{p}_u(y) \hat{q}_u} \quad (3)$$

目标定位就是在每一帧中寻找使相似性测度 Bhattacharyya 系数  $\hat{\rho}(y)$  最大的候选目标区域的中心位置  $y$ 。可采用以下迭代过程寻找  $\hat{\rho}(y)$  的极大值<sup>[3]</sup>:

$$\hat{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} x_i \omega_i g \left( \left\| \frac{\hat{y}_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right)}{\sum_{i=1}^{n_h} \omega_i g \left( \left\| \frac{\hat{y}_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right)} \quad (4)$$

式中:  $g(x) = -k'(x)$ ,  $\hat{y}_0$  表示当前跟踪窗口的中心位置,  $\omega_i$  表示像素  $x_i$  的权重。

$$\omega_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{\hat{q}_u}{\hat{p}_u(\hat{y}_0)}} \delta[b(x_i) - u] \quad (5)$$

得到 4 个核跟踪器的独立跟踪结果后,采用以下的拓扑约束方法进行跟踪结果的优化和组合。如图 4 所示,(a)中  $O$  点表示在上一帧选定的待跟踪目

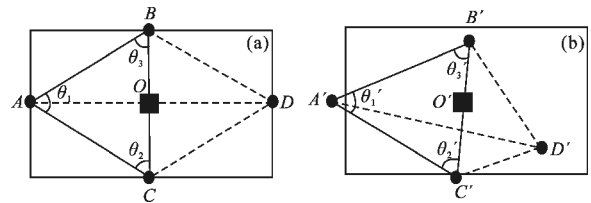


图 4 拓扑约束示意图

Fig.4 Illustration of topology constraint

标中心,黑色方框表示相应的目标区域, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  点表示 4 个核跟踪器的初始目标中心。在下一帧中,4 个核跟踪器的独立跟踪结果分别为  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  点。文中提出的拓扑约束方法如下所述:

- (1) 预设相似性测度阈值  $Bha\_th$ ,内角差值和阈值  $AngleDiffSum\_th$ 。文中根据经验将其分别预设为 0.9 rad 和 0.2 rad。
- (2) 计算下一帧图像中 4 个跟踪结果对应的 Bhattacharyya 系数  $\rho(y)$ 。
- (3) 如果 4 个单核跟踪结果均满足  $\rho(y) > Bha\_th$ ,则分别以图 4(a)的 4 个初始目标中心和图 4(b)的 4 个跟踪结果为顶点,构建三角形。以内角差值和  $AngleDiffSum$  为相似性测度,求出两图中最相似的三角形对,即  $AngleDiffSum$  最小的三角形对。如果最相似的

三角形对满足  $\text{AngleDiffSum} < \text{AngleDiffSum}_{th}$ , 则其对应的核跟踪器为跟踪性能最优的跟踪器, 用于组合得出最终跟踪结果。以图 4 为例, 图中三角形  $ABC$  和  $A'B'C'$  满足上述要求, 则最终的跟踪目标中心  $O'$  点由  $A$ 、 $B'$  和  $C'$  点共同决定, 其行数为  $A'$  的行数, 列数为  $B'$  点和  $C'$  点列数的中间值。其他情况以此类推。

(4) 如果只有 3 个单核跟踪结果满足  $\rho(y) > \text{Bha}_{th}$ , 同样以内角差值和  $\text{AngleDiffSum}$  为相似性测度, 考察两图中对应序号的三角形的相似性。如果对应序号的三角形满足  $\text{AngleDiffSum} < \text{AngleDiffSum}_{th}$ , 则以该对相似三角形组合得出最终的跟踪目标中心, 组合方式同上。否则继续步骤(5)。

(5) 如果  $\text{Bhattacharyya}$  系数测度或内角差值和测度的阈值约束使得多核跟踪不能建立相似三角形, 则以 4 个跟踪结果中  $\text{Bhattacharyya}$  系数最大的那个核的跟踪结果为准, 根据上一帧中相对应的单核目标中心与待跟踪目标中心的几何关系, 推出最终的跟踪结果。

可以看出, 文中方法采用多个核跟踪器之间的拓扑关系进行约束, 能够从多个核跟踪结果中选取出拓扑结构最为稳定可靠的核跟踪结果, 从而避免部分遮挡导致某个核跟踪器失效对跟踪带来的负面影响。文中采取三角形结构这样一种简单的拓扑结构, 可以避免繁琐的计算, 提高跟踪算法的实时处理性能。

## 4 实验结果与分析

为了验证文中算法对目标位置偏差和部分遮挡的有效性, 进行了以下跟踪实验。

### (1) 存在目标位置偏差

实验序列为一段前视红外建筑物图像序列。由于飞行器的机动, 其中部分相邻帧间待跟踪目标存在着较大的位置偏差, 如图 5 中的第 11 帧和第 12 帧, 无法满足核跟踪算法对迭代步长的要求。采用文中方法提出的基于投影直方图匹配的位置预测方法可得出, 第 11 帧和第 12 帧图像之间的位置偏差为  $(80, 0)$ , 而真实偏移量为  $(91, 1)$ 。与此同时, 采用文中位置预测的判断模块可以得知, 第 10 帧和第 11 帧之间的目标位置偏差较小, 不需要进行位置预测。图 5 给出了对第 12 帧的跟踪结果对比, 其中实线方框表示加入位置预测模块后得到的跟踪结果, 虚线方

框表示没有位置预测模块后得到的跟踪结果, 跟踪算法均采用文中提出的基于拓扑约束的多核跟踪算法。可以看出, 文中提出的基于投影直方图匹配的位置预测方法能够消除前后帧之间目标的主要位置偏差, 为后续核跟踪提供更为精确的初始跟踪位置, 从而克服前后帧图像中目标位置偏差对跟踪精度的影响。

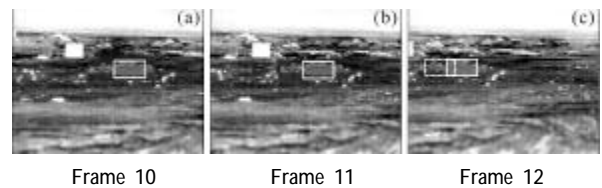


图 5 存在目标位置偏差的目标跟踪

Fig.5 Tracking results for target with location deviation

### (2) 存在目标部分遮挡

为验证该算法在存在目标部分遮挡情况下的跟踪性能, 对原始图像序列增加部分模拟遮挡, 模拟的遮挡物为烟雾, 对目标建筑物进行随机遮挡, 生成的模拟序列包括 55 帧图像。实验中将文中提出的多核跟踪算法与标准单核跟踪算法进行了比较, 两个算法均采用灰度和 LBP 纹理的联合直方图对目标模型进行描述。图 6 给出了部分视频帧上的跟踪结果,

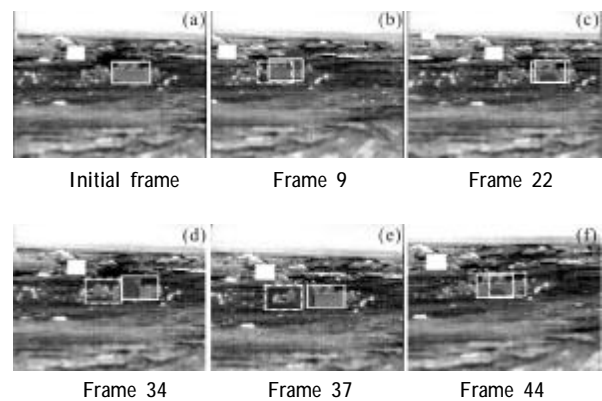


图 6 “building” 上的部分视频帧的跟踪结果

Fig.6 Tracking results of the building sequence with partial occlusion

图 6(a)-(f) 中实线方框表示文中算法的跟踪结果, 虚线方框表示标准核跟踪算法的跟踪结果。图 7 给出了相应的跟踪位置误差曲线, 跟踪位置误差以人工手动标定的真实位置和跟踪器输出的目标中心位置之间的欧氏距离来表示。

由图 6 和图 7 可知, 文中提出的多核跟踪算法在遮挡时能够准确地跟踪到目标, 而标准单核跟踪

算法则存在较大的跟踪误差,随着遮挡的加剧,标准单核跟踪算法的误差曲线急剧上升,而多核跟踪算法的误差曲线仍然保持平稳。在整个视频序列上,多核跟踪算法的平均跟踪误差为 7.15 个像素,而标准单核跟踪算法的平均跟踪误差为 17.79 个像素。实验结果充分证明了提出的基于拓扑约束的多核跟踪算法对遮挡情况的鲁棒性。

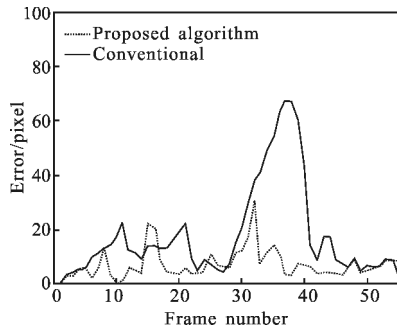


图 7 “building”上的跟踪误差曲线

Fig.7 Curves of tracking errors of the building sequence

在存在目标部分遮挡时,基于拓扑约束的多核跟踪算法明显优于标准单核跟踪算法,这是由于该算法的特点是从 4 个独立的核跟踪结果中依据拓扑约束和相似性测度选取出其中最优化最稳定的跟踪结果,组合得出最终的跟踪结果。在遮挡现象发生时,遮挡物的存在必然导致目标物的外观发生严重变化,基于灰度和 LBP 特征的目标模型受到严重影响,因此导致标准单核跟踪算法的偏移,而多核跟踪算法中,目标未受遮挡的部分所在的核跟踪器的跟踪性能未受到遮挡影响,能够给出比较稳定可靠的跟踪结果。

## 5 结论

目标位置偏差和部分遮挡是前视红外目标跟踪中影响跟踪精度的两个重要因素。文中在进行基于投影直方图匹配的目标位置预测的基础上,提出了一种基于拓扑约束的多核跟踪算法,旨在解决存在目标位置偏差和部分遮挡时的目标跟踪问题。其创新之处主要在于:第一,采用基于投影直方图匹配的目标位置预测方法,得出相邻两帧图像间的平移关系,消除相邻两帧图像中待跟踪目标的位置偏差;第二,在待跟踪目标的边界选取多核跟踪器,以充分利用目标的前景和背景信息,提高目标模型的可鉴别

性,然后采用拓扑约束从多个独立的跟踪结果中优化和组合得到最终的跟踪结果。这种目标模型和多核跟踪器的构建方法能够降低杂波干扰,提高算法的跟踪精度。实验结果表明,文中算法对存在目标位置偏差和部分遮挡的目标跟踪具有较好的准确性与鲁棒性,具有计算复杂度低,实用性强的特点。

## 参考文献:

- [1] Fan Jinxiang, Zhang Yuan, Wang Sheyang. Analysis of application status of ATR technologies in infrared imaging guided missiles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 778-781. (in Chinese)
- [2] Luo Haibo, Shi Zelin. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 565-573. (in Chinese)
- [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] Yao Anbang. Weight estimation and state update in particle filtering for visual tracking [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [5] Venkataraman V, Fan G L, Fan X. Target tracking with online feature selection in FLIR imagery [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 18-23.
- [6] Yilmaz A, Shafique K, Shah M. Tracking in airborne forward looking infrared imagery [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(7): 623-635.
- [7] Sanna A, Pralio B, Lamberti F, et al. Novel ego-motion compensation strategy for automatic target tracking in FLIR video sequences taken from UAVs [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45 (2): 723-734.
- [8] Adam A, Rivlin E, Shimshoni I. Robust fragments-based tracking using the integral histogram [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006: 798-805.
- [9] Wang Fanglin. Research on Important Issues of Robust Visual Tracking [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [10] Jia Huixing. Pedestrian Motion Analysis in Video Based on Histograms of Oriented Gradients [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [11] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multi-resolution gray scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 971-987.