

## 基于改进 Mean-Shift 算法的红外小目标跟踪

杨一帆<sup>1,2</sup>, 田雁<sup>1</sup>, 杨帆<sup>2,3</sup>, 黄彪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600)

**摘要:** 复杂背景下的红外小目标跟踪在目标跟踪领域一直是重要的研究方向。由于小目标体量小、机动性大, 而红外图像大多受到严重的背景噪声和热噪声影响, 使得针对红外小目标的跟踪大多出错率高, 鲁棒性不强。针对红外小目标的跟踪, 提出了一种改进的 Mean-Shift 算法。结合图像的统计特性, 提出了一种自适应非线性算法对图像进行处理; 同时融合了图像的梯度直方图对目标进行描述。实验通过对高强度噪声和高遮挡环境下视频目标进行跟踪, 比较了传统 Mean-Shift 算法和改进后算法的跟踪效果, 结果显示文中提出的改进算法不但可以有效地跟踪目标, 而且大幅降低了跟踪窗口与目标之间的相对抖动, 增强了跟踪算法的鲁棒性。

**关键词:** Mean-Shift; 红外小目标; 自适应; 非线性; 融合

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2164-06

## Tracking of infrared small-target based on improved Mean-Shift algorithm

Yang Yifan<sup>1,2</sup>, Tian Yan<sup>1</sup>, Yang Fan<sup>2,3</sup>, Huang Biao<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China;

3. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710600, China)

**Abstract:** Small-target tracking in infrared imagery with a complex background is always an important task in object tracking fields. Small and manoeuvrable objects in complex clutter and highly noised background usually results in serious false alarm in target tracking for low contrast of infrared imagery. An improved Mean-Shift algorithm to handle the influence of complex background during tracking the small-target in infrared imagery was proposed. This work proposed an adaptive nonlinear machine to help Mean-Shift algorithm to get stable histogram of the interesting areas. This machine expanded the information of object histogram refer to the mean value of tracking window, as well as reduced the noise part of tracking window refer to the standard deviation of it. At the same time, algorithm fused the histograms of gradient with histogram of gray-value to describe the target. To validate the effect of

收稿日期: 2013-11-10; 修订日期: 2013-12-13

作者简介: 杨一帆(1987-), 男, 硕士生, 主要从事图像目标跟踪方面的研究工作。Email: yangyifan@yeah.net

导师简介: 田雁(1975-), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事图像处理、视频跟踪与模式识别方面的研究工作。

Email: ty\_cas@163.com

the proposed algorithm, the last part conduct a series tracking experiments which choose highly noised and cluttered videos as their candidates. The comparison of the tracking results between traditional Mean-Shift algorithm and improved Mean-Shift algorithm shows that the proposed algorithm has a more accurate tracking effect. Further more the proposed algorithm highly reduced the wobbling between small-target and tracking window. This indicates that the improved algorithm achieved more robustness.

**Key words:** Mean-Shift; small-target; adaptive; nonlinear; fusion

## 0 引言

红外小目标的探测、跟踪是红外搜索跟踪(IRST)系统的主要任务<sup>[1]</sup>。通常远距离时,红外目标在图像中只占几个像素的位置,信号强度弱,并且缺乏纹理、细节等结构信息<sup>[2]</sup>。同时,由于受传输造成的能量衰减及传感器噪声的影响,导致目标信号强度很弱,容易被背景热噪声淹没。因此,设计一种稳健、有效的红外目标跟踪算法成为当前国内外红外成像技术研究的关注点之一。

随着科技的发展,跟踪算法的种类越来越多。这些算法的区别主要表现在两个方面。首先是目标的描述方面:有依据图像灰度进行描述的,也有通过边缘<sup>[3]</sup>、纹理、特征空间、角点、形心、图像片断或者 3D 几何模板等进行描述的<sup>[4]</sup>。其次是预测目标位置方法的不同:有的通过对图像做相关运算,有的对矢量进行加权,也有通过粒子滤波器以及 Kalman 滤波器进行预测的,还有通过最优方程估计位置的。基于红外小目标本身没有纹理等信息,同时受遮挡、噪声等恶劣背景干扰严重的特性,很多算法并不适用于红外小目标的跟踪。

Mean-Shift 算法利用直方图描述目标,使用矢量进行加权来定位目标位置。它的特征计算简单,对图变化不敏感,需要信息量较少,计算速度快,能够实时跟踪目标,在非刚性目标跟踪领域有着广泛的应用<sup>[5]</sup>。所以文中选用 Mean-Shift 算法来实现对红外小目标的跟踪。

自 Dorin Comaniciu 将 Mean-Shift 算法引入目标跟踪领域以来<sup>[6]</sup>,传统的 Mean-Shift 算法有了很多改进。但在针对红外小目标的应用中,Mean-Shift 算法因为无法获得目标区域的稳定灰度统计而不能发挥功效,成为跟踪的主要瓶颈之一。文中提出的改进算法可有效提高大动态场景辐射条件下弱小目标以及低对比目标场景的细节特征,从而保证跟踪算

法的有效施行。

## 1 传统 Mean-Shift 算法

传统的 Mean-Shift 算法是一种基于密度梯度的无参数估计算法,同时也是一个典型的迭代算法。每次迭代主要分三个步骤:首先对前一帧目标进行描述;然后对当前帧图像进行操作,用初始窗口内的像素点求得 Mean-Shift 矢量,矢量把初始点引导至附近相似度更高的位置;再计算得到新区域与目标之间的相似度,便完成一次迭代。当相似度没有达到要求时,以新区域的中心作为新的起始位置,重复最后的两个步骤,直到找到整幅画面中相似度最高的点,便达到了跟踪目标模板的目的。

Mean-Shift 算法采用带空域信息的灰度直方图来描述所跟踪的目标<sup>[7]</sup>,这里用集合  $\{x\}, i=1,2,\dots,u$  来表示模板  $A$  内的像素位置:

$$P_b = C \sum_{i=1}^m k\left(\frac{y-x_i}{h}\right) \delta[B(x_i)-b]$$

$$\sum_{b=1}^m P_b = 1, b=1, \dots, m \quad (1)$$

式中:  $P_b$  为直方图中对应灰度值的概率;  $C$  为归一化因子;  $k(\cdot)$  为一个核函数;  $h$  为跟踪窗口的大小;  $b$  对应每个灰度值。

然后计算 Mean-Shift 矢量<sup>[8]</sup>:

$$\Delta x = \frac{\sum_a K(a-x)w(a)a}{\sum_a |K(a-x)w(a)|}$$

$$a \in A \quad (2)$$

式中:  $K(\cdot)$  为核函数,用来计算各像素点的位置信息。  $w$  是可以为负数的权值<sup>[9]</sup>:

$$w_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u}} \delta[B(x_i)-b] \quad (3)$$

计算  $w$  可以得到图像之间的相关性信息。对各像素点的这些信息进行累加,就可以得到一个指示相似度最大方向的矢量。原始位置加上这个矢量,便

把窗口移动到了新的搜索位置<sup>[10]</sup>。

相似度的计算大多采用 Bhattacharyya 系数:

$$\rho = \sum_{i=1}^m \sqrt{p_i \cdot q_i} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为两幅图像的相似度。

## 2 改进的直方图描述方法

改进算法在统计直方图之前, 首先对目标区域进行预处理, 来改善跟踪区域的信噪比。预处理在固定带宽内扩展目标描述信息, 提升直方图的信息量。为了提升信息量, 文中使用非线性算法对图像的灰度进行预处理。考虑到实时性要求, 选择一阶非线性算法来对目标区域进行处理:

$$\text{Value}(i) = \begin{cases} v, 0 \leq B(x_i) \leq L \\ l \cdot B(x_i) + (1-l) \cdot M, L \leq B(x_i) \leq H \\ u, H \leq B(x_i) \leq 255 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $B(x_i)$  为处理前各像素的灰度值;  $\text{Value}(i)$  为非线性处理后得到的灰度值;  $l$  为非线性程度的度量;  $M$ 、 $L$ 、 $H$  决定了处理后描述图像内容的信息空间;  $v$ 、 $u$  为预设的门限值, 用来替代噪声信息的原始灰度值。如果使用常数预设这些参数, 会直接导致目标信息的丢失。文中算法使用图像的统计信息来设置这些参数。

$M$  由图片的均值确定。由于红外图像不反应成像物体的细节和纹理信息, 而单个物体所成图像灰度值分布集中。图像内的噪声认为是高斯噪声, 均值趋向于 0, 所以均值信息可以近似地表示目标的平均灰度信息。

$l$  由图像的标准方差  $\sigma$  来确定:

$$l = \begin{cases} 1, 8 \leq \sigma \leq 1 \\ \sigma, 1 \leq \sigma \leq 8 \\ 8, 8 \leq \sigma \end{cases} \quad (6)$$

图像的标准差越高, 说明图像内的噪声越高, 则需要屏蔽的灰度信息也就越多, 因此原始灰度需要扩展的带宽也就越窄,  $l$  也越大。当  $l$  小于 1 时, 非线性算法会压缩灰度带宽, 应该截断; 当  $l$  太大时, 又会损失过多信息,  $l$  取值有限。8 作为  $l$  的上限是在实验中得出的一个经验值。图 1 展示了不同  $l$  值对原始灰度信息的扩展情况。

图中  $M$  以选取 128 为例来显示不同值对图像的

作用,  $v$  选取 1,  $u$  选取 250。可见当  $l$  越大时,  $M$  附近的灰度扩展越大, 同时保留的信息也越少。

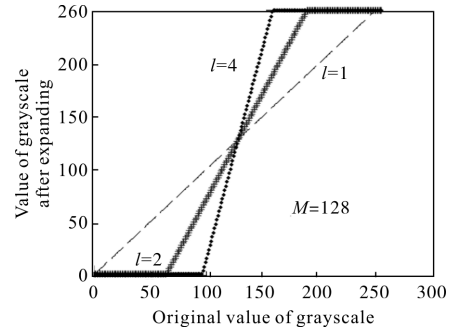


图 1 不同  $l$  值对原始灰度值的作用

Fig.1 Different  $l$  effects on original grayvalue

灰度的扩展带宽在非线形算法过程中十分重要, 它由下面几个因素决定:

$$\begin{aligned} L &= M - \frac{v}{l} + \frac{M}{l} \\ H &= M - \frac{u}{l} + \frac{M}{l} \\ b &= \frac{u-v}{l} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $L$ 、 $M$  分别为原始灰度在非线形算法中的折点, 它的变化需要围绕  $M$  变化, 使得跟踪目标在处理前后灰度变化不大;  $v$ 、 $u$  分别为处理后灰度的折点, 一般设置为 1 和 250, 它们共同限定了处理前后的灰度带宽。

## 3 改进的目标描述方法

算法针对 Mean-Shift 算法对目标描述能力较弱、在光照变化下容易失效的特点进行了改进。在不改变整体运算结构的情况下, 该算法采用结合了梯度信息的融合框架:

$$\hat{\rho}(y) = \sum_{u=1}^3 \lambda^{(u)} \rho^{(u)}, \sum_{u=1}^3 \lambda^{(u)} = 1 \quad (8)$$

式中:  $\hat{\rho}(y)$  为融合后得出的目标描述方法;  $\rho^{(u)}$  为其中一种相似度的评价方法;  $\lambda^{(u)}$  为相对于该标准的权值。依然采用公式(4)所表述的 Bhattacharyya 系数来计算。

在经过上一节的预处理后, 目标区域的噪声会显著下降, 目标与背景的分度增强, 因而梯度信息将更加集中在边缘, 如图 2 所示。

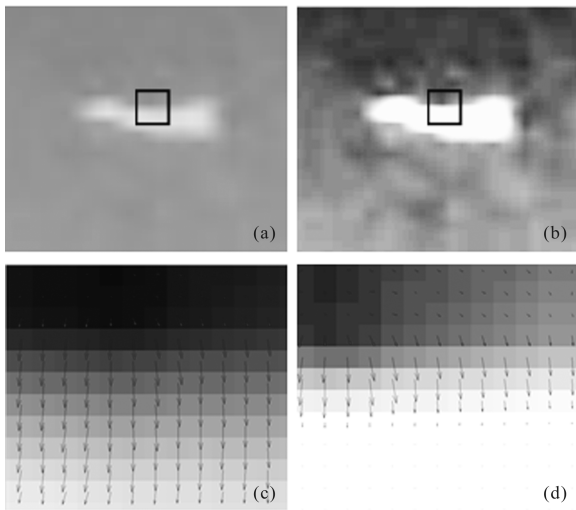


图 2 预处理前后梯度的变化

Fig.2 Change of gradient of target after preprocessing

图 2(a)、(b)框内是选取的放大位置。图 2(a)、(b)分别为预处理前后的目标图像,图 2(c)、(d)分别为其对应选取框的梯度分布情况(图 2(a)、(c)为 i 组;图 2(b)、(d)为 ii 组)。

该算法分别对梯度的  $x$  分量和  $y$  分量做直方图统计,结合已有的灰度直方图形成三个针对目标的描述信息;再各自结合空间信息得到目标的描述。梯度  $x$  分量直方图、梯度  $y$  分量直方图以及灰度直方

图对应的权值分别为 20%、20%和 60%。这样地比例可以让目标描述方法更好地应对目标在照度变化情况下的跟踪稳定性。

改进后的 Mean-Shift 算法的流程图如图 3 所示。

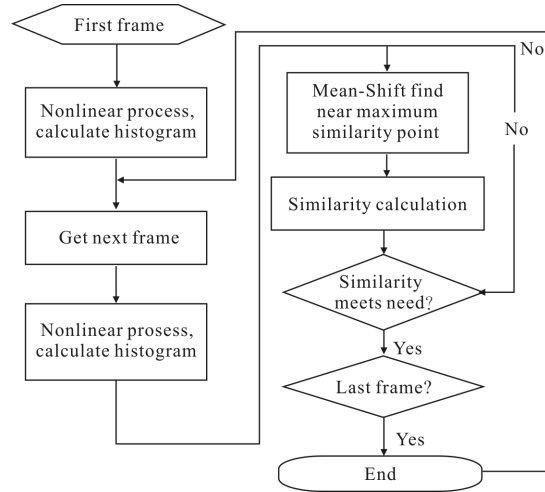


图 3 跟踪算法流程图

Fig.3 Flow chart of tracking algorithm

### 4 实验结果及分析

为了验证文中算法的有效性,实验选取了三段 8 位的红外视频,见表 1,其中圈内是待跟踪的目标,

表 1 实验视频指标统计

Tab.1 Statistics of videos used as candidates of experiments

	Video A	Video B	Video C
Image size/pixel	256×200	256×200	320×240
Sequence length/frame	30	40	256
Object size/pixel	6×8	12×16	2×2
Noise scale	Large	Little	Very large
Object speed/ (pixel · frame <sup>-1</sup> )	Mean 2 Max 5	10 115	2 6

它们分别在不同环境里对飞行目标进行拍摄。

视频中都含有不同程度的噪声,其中有明显的云层噪声,以及由于能量衰减和传感器带来的热噪

声。特别是在视频 C 中,目标信号极弱,噪声信号却极强,单帧图像中人眼几乎察觉不到目标的存在,目标湮没在了热噪声中。实验在 PC 机上进行,通过



MATLABR2011a 仿真完成。跟踪目标在图像序列第一帧由手动选定。

图4(图 4(a)、(c)、(e)为 i 组,图 4(b)、(d)、(f)为 ii 组)显示了改进 Mean-Shift 算法和传统算法在视频 B 中的应用,窗口后的曲线是提取出的运动轨迹。三帧图像选取图像序列的第 1 帧、第 6 帧和第 40 帧。i 组图像中传统 Mean-Shift 算法在第 6 帧时已偏移目标,不久即完全丢失目标。相比之下,使用了改进算法的 ii 组图像跟踪效果良好。

图 5 是图 4 跟踪实验的误差对比图。可以看出,文中算法精确定位目标位置,传统算法在第 6 帧处误差明显增大,直到最后目标丢失,误差呈现近似指数倍率的增长。

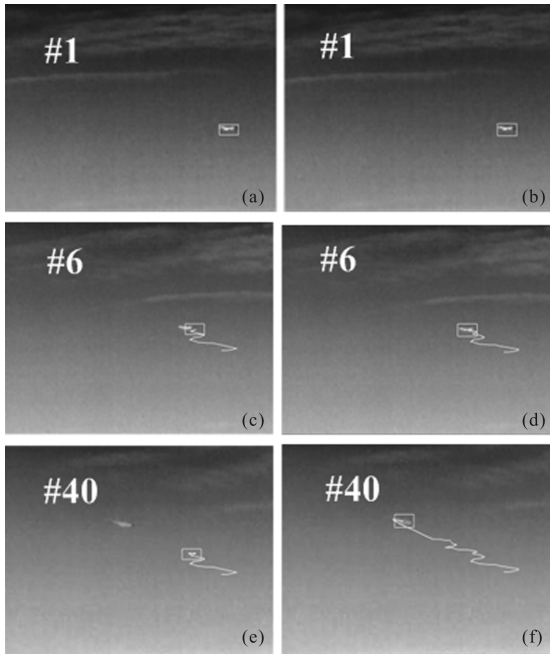


图 4 改进算法对跟踪效果的改善

Fig.4 Improvement of tracking results due to improved Mean-Shift algorithm

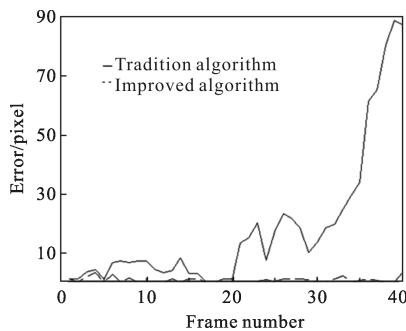


图 5 视频 B 跟踪误差

Fig.5 Tracking error of video B

图 6(图 6(a)、(c)为 i 组,图 6(b)、(d)为 ii 组)显示了改进 Mean-Shift 算法和传统算法在 A、B 两段视频中的应用。观察 ii 组图像不难发现,使用改进 Mean-Shift 算法提取出的运动轨迹相对于 i 组的更为平滑。分析发现,a 圈内的轨迹毛刺是飞行器在飞离云层时窗口相对于目标产生的抖动;b 圈内的轨迹毛刺则是由于目标转向引起迭代次数增多,造成了抖动。由此可以看出,改进算法降低了噪声的影响,使得窗口相对目标的抖动明显减少,提升了跟踪算法的鲁棒性。

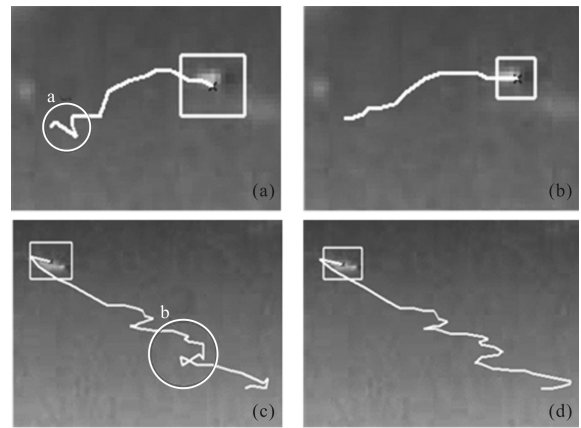


图 6 改进算法对于跟踪轨迹的改善

Fig.6 Improvement of tracking trails due to improved Mean-Shift algorithm

图 7 是图 6 所示实验的跟踪误差对比图。可以看出,文中算法精确定位目标位置,防止产生轨迹毛刺。其中第 6 帧附近出现的峰值对应于图 6 中 b 圈内的轨迹毛刺。

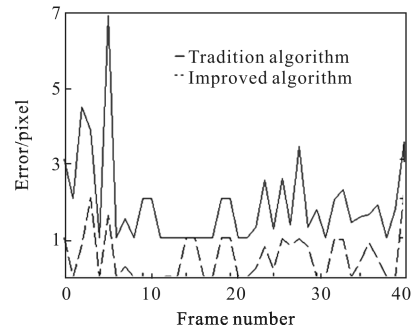


图 7 视频 A 跟踪误差

Fig.7 Tracking error of video A

图 8 是算法在视频 C 中的应用,视频 C 中目标大小与噪声颗粒大小相近,而噪声强度很大。从跟踪结果来看,飞行目标从画面的右上角向左下角移动,

噪声愈来愈大。算法可以持续正确跟踪目标,但轨迹毛刺明显,这是由于目标信号与噪声信号区分不大的原因。

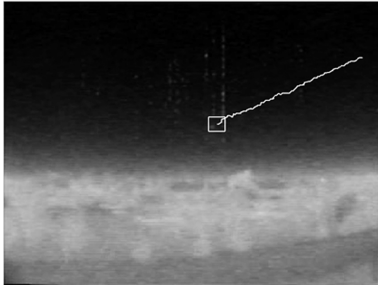


图 8 视频 C 的跟踪结果

Fig.8 Tracking result of video C

## 5 结 论

在传统 Mean-Shift 算法的基础上提出了一种自适应的非线性改进算法。这种算法主要应用在对红外小目标的跟踪应用中。通过自适应的非线性算法对图像进行处理,抑制了噪声和背景遮挡等特殊情况对目标跟踪的干扰。提高了目标探测能力,改善目标识别概率,提高了跟踪算法的鲁棒性。

在第三组实验中,由于目标和噪声区分度不够而产生了轨迹毛刺,还需要在文中算法中加入轨迹平滑和滤波,后续将进行进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. *IEEE Trans Pattern Anal.* 2003(5): 564-575.
- [2] Jin Weiqi, Liu Bin, Fan Yongjie, et al. Review on infrared image detail enhancement techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 40(12): 2521-2527. (in Chinese)  
金伟其, 刘斌, 范永杰. 红外图像细节增强技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 40(12): 2521-2527.
- [3] Tang Zhengyuan, Zhao Jiajia, Yang Jie, et al. Infrared target tracking algorithm based on sparse representation model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (5): 1398-1395. (in Chinese)  
唐峥远, 赵佳佳, 杨杰, 等. 基于稀疏表示模型的红外目标跟踪算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1398-1395.
- [4] David R, Jongwoo L. Adaptive probabilistic visual tracking with incremental subspace update [C]//ICSC, 2003, 2: 234-240.
- [5] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using Mean Shift [C]//Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 142-149.
- [6] Robert T. Mean-shift blob tracking through scale space [C]//ECCV, 2004, 3022: 470-482.
- [7] Gao Chunlei, Yi Weining, Cui Wenyu, et al. Simulation of infrared imaging in different atmospheric conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 258-591. (in Chinese)  
高春雷, 易维宁, 崔文煜, 等. 不同大气条件下红外成像效果模拟 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 258-591.
- [8] Cheng Y. Mean Shift, mode seeking, and clustering [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8): 790-799.
- [9] Gao Guowang, Liu Shangqian, Qin Han lin, et al. Robustness tracking algorithm for the infrared target under complex background noise [J]. *Journal of Xidian University (Natural Science Edition)*, 2010, 37(6): 1099-1102. (in Chinese)  
高国旺, 刘上乾, 秦翰林, 等. 强背景噪声下红外目标的鲁棒性跟踪算法 [J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(6): 1099-1102.
- [10] Fan Xinnan, Ding Penghua, Liu Junding, et al. Infrared object tracking based on gray and SURF features fusion [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(11): 1376-1383. (in Chinese)  
范新南, 丁朋华, 刘俊定, 等. 融合灰度和 SURF 特征的红外目标跟踪 [J]. *中国图形图像学报*, 2012, 17(11): 1376-1383.