

文章编号:1007-2780(2018)12-1040-07

基于改进纹理特征的红外目标跟踪算法

卢 杨, 张 磊*, 郭立媛, 杜若鹏

(河北工业大学 人工智能与数据科学学院, 天津 300130)

摘要:针对红外图像背景复杂、杂波干扰严重、相似目标混淆导致的目标跟踪丢失问题,本文提出了一种改进的低维度纹理特征 OCS-LBP(Oriented Center Symmetric Local Binary Patterns,即方向中心对称的局部二值模式)。首先,利用此特征可以高效地获取目标图像中每个像素块的梯度方向和幅值信息,提高了跟踪过程的鲁棒性;其次,利用核相关滤波算法结合提取的 OCS-LBP 特征对目标图像区域进行模型训练;最后,根据训练好的模型检测下一帧图像中目标的具体位置。本文在 10 组红外视频序列上进行了测试,实验结果表明,本文算法的精确度和成功率相比于第二名算法分别获得了 2.9%和 9.9%的提升,同时在实验设备上算法的平均跟踪速度相比于第二名算法提升了 14.15 frame/s。从实验结果可以看出本文提出的算法在红外目标跟踪上表现出较好的鲁棒性、准确性和实时性,具有一定的研究和实用价值。

关键词:机器视觉;目标跟踪;红外图像;OCS-LBP 特征;核相关滤波

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183312.1040

Infrared target tracking based on improved LBP feature

LU Yang, ZHANG Lei*, GUO Li-yuan, DU Ruo-peng

(School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to solve the problem that loss of target caused by complex background, serious clutter interference and similar target confusion in infrared image tracking, this paper proposes an improved low-dimensional texture feature OCS-LBP (Oriented Center Symmetric Local Binary Patterns). First, according to this feature, the gradient direction and amplitude information of each pixel block in the target image can be efficiently acquired, which improves the robustness of the infrared target tracking. Secondly, the kernel correlation filter algorithm combined with the OCS-LBP features is used from infrared target image to training model. Finally, based on the trained model, the target can be detected in the next frame of infrared image. In this paper, the proposed algorithm is tested for 10 video sequences. The result shows that the accuracy and the success rate of the proposed algorithm are improved by 2.9% and 9.9% higher than the second algorithm respectively. At the same time, the average tracking speed of the proposed algorithm on the computer improves 14.15 frame/s. From the experimental results, it can be seen that OCS-LBP feature has better robustness, accuracy and real-time performance in infrared target tracking than traditional features, which has certain research and practical value.

收稿日期:2018-06-20; **修订日期:**2018-08-03.

基金项目:河北省科技计划项目(No.16210315D)

Supported by Hebei Science and Technology Planning Project(No.16210315D)

* 通信联系人, E-mail: zhanglei@hebut.edu.cn

Key words: machine vision; target tracking; infrared image; OCS-LBP feature; kernel correlation filter

1 引言

在机器视觉领域,目标跟踪是极具实用价值的热点课题之一。传统的目标跟踪算法主要是基于可见光视频序列进行分析,但是由于夜间环境的特殊性,可见光图像无法准确地捕获目标物体图像,因此选用红外摄像机在低光照环境下进行视频的摄录,得到了较好的效果。然而,相比于可见光图像的目标跟踪,红外图像的目标跟踪往往存在背景复杂、杂波干扰严重、相似目标混淆等特点^[1],这使得实现稳定准确的红外目标跟踪更具挑战性。

对于红外图像下的目标跟踪问题,随着国内外学者不断地研究,已经取得了一定的成果。He 等^[2]针对于红外图像下的目标跟踪,设计了一种加权相关滤波器,在检测阶段提出一种利用低秩表示的红外目标检测方法,在过滤阶段提出了融合不同目标特征的多特征函数。Huang 等^[3]设计了一种应用边缘信息和分割优化的通用目标跟踪器并应用于红外飞鸟追踪任务。龚俊亮等^[4]针对红外图像中的多目标跟踪问题,提出一种改进的辅助粒子滤波与马尔科夫随机场结合的算法。刘火平等^[5]为了消除红外图像序列中背景的不均匀,提出了一种基于实时线性标定的非线性红外图像校正方法。江山等^[6]针对低对比度、低信噪比、目标旋转、缩放等问题,提出一种灰度图像多特征融合目标跟踪算法。许多红外目标跟踪算法大多借鉴了可见光下的目标跟踪算法,如 Danelljan 等^[7]提出了一种基于自适应颜色属性(CN)方法,通过定义的 11 种颜色空间特征对目标进行追踪;毛宁等^[8]提出了一种基于多特征融合与多模板协同的目标跟踪算法;郭巴秋等^[9]提出了一种改进的粒子群优化目标跟踪方法等等。

但是以上算法都没能很好地解决在跟踪过程中因红外图像背景复杂、杂波干扰严重、相似目标混淆造成跟踪目标丢失的问题。本文在核相关滤波算法(KCF)的基础上,提出 OCS-LBP 特征以提升红外目标跟踪的性能。

2 KCF 目标跟踪算法

在信号处理领域,相关滤波算法^[10]是一种衡量两个信号相似程度的算法,因其算法的高效性,后被广泛应用于目标跟踪领域。在目标跟踪问题上,相关滤波算法通过设计并训练滤波模板,得到目标在下一帧中响应最大的位置,实现目标跟踪。

2.1 循环矩阵

相比于传统跟踪算法采样样本少、容易产生冗余等特点,KCF 算法引入循环矩阵,通过对图像中的目标区域进行循环位移,从而产生大量样本提供给分类器进行训练。

为简单描述,记基准样本 $\mathbf{x}$ 为 $n \times 1$ 维向量。为了扩充基准样本 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,利用置换矩阵 $\mathbf{P}$ 的特性做循环位移,以此获取大量训练样本并对分类器进行训练,其中样本集合为 $\{\mathbf{P}^u \mathbf{x} \mid u = 0, \dots, n-1\}$,置换矩阵为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

定义循环矩阵为 $\mathbf{X}$,对基准样本做循环位移后,将所有向量进行组合得到:

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_n & x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} \\ x_{n-1} & x_n & x_1 & \cdots & x_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由循环矩阵 $\mathbf{X}$ 可以看出,其第一行为向量 $\mathbf{x}$,第二行则将向量 $\mathbf{x}$ 的元素向右移动一位,其他行按此规则可以类推。

根据循环矩阵的定义,应用傅里叶变换将矩阵 $\mathbf{X}$ 变成对角矩阵:

$$\mathbf{X} = \mathbf{F} \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{F}^H, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{F}$ 为离散傅里叶变换矩阵, $\hat{\mathbf{x}}$ 为向量 $\mathbf{x}$ 的离散傅里叶变换, $\mathbf{H}$ 表示矩阵的共轭转置。

2.2 分类器训练

KCF 算法引入岭回归模型,定义线性分类器 $f(x) = w^T x$, 利用训练样本集 (x_i, y_i) 训练线性分类器,其中分类器参数 w 满足:

$$\min_w \sum_i (f(x_i) - y_i)^2 + \lambda \|w\|^2, \quad (4)$$

其中: λ 表示控制过拟合的正则化参数, w 表示权值向量。式(4)存在封闭解,即:

$$w = (X^H X + \lambda I)^{-1} X^H y, \quad (5)$$

之后应用核函数^[11]对式(5)进行非线性变换,则目标 w 的解可表示为:

$$w = \sum_i \alpha_i \varphi(x_i), \quad (6)$$

在式(6)中,根据函数 $\varphi(x_i)$ 特性,训练样本被映射到高维特征空间中。与此同时,将求解权值向量 w 的问题转化为求解 α_i 的问题。为了求出岭回归的封闭解,利用核函数的正则化最小二乘^[12]得出:

$$\alpha = (K + \lambda I)^{-1} y, \quad (7)$$

其中 K 表示核矩阵且具有循环矩阵特性^[13],因此应用离散傅里叶运算对式(7)做变换,可得:

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{y}}{\hat{k}^{xx} + \lambda}, \quad (8)$$

其中 k^{xx} 表示矩阵 K 的第一行元素。

2.3 快速检测

将新输入的图像块 z 送入分类器,计算其响应函数为:

$$f(z) = w^T z = \sum_i \alpha_i k(z, x_i). \quad (9)$$

通过循环矩阵的特性不断对输入图像块做循环位移构造并运用分类器计算目标区域中响应最大的位置。令 K^z 为训练样本和输入图像块循环位移组成的核矩阵。根据西不变核函数的定义,可得 K^z 为循环矩阵,即:

$$K^z = C(k^{xz}), \quad (10)$$

K^z 表示训练样本和输入图像块循环位移组成的核矩阵, k^{xz} 表示 x 和 z 之间核相关。由此,可以计算得到分类器的响应为:

$$f(z) = (K^z)^T a, \quad (11)$$

其中 $f(z)$ 表示一个向量,即输入图像块的响应结果。为了实现快速计算,根据循环矩阵的性质对公式(11)进行离散傅里叶变换:

$$\hat{f}(z) = \hat{k}^{xz} \cdot \hat{a}, \quad (12)$$

其中 $\cdot$ 表示点乘。

2.4 确定目标尺度

本文参考基于相关滤波的尺度自适应目标跟踪算法^[14],即多尺度空间滤波器(DSST),来解决在红外目标跟踪过程中出现的尺度变化问题,保证目标跟踪的准确性。通过训练一个独立的一维相关滤波器^[10]去评估红外运动目标的尺度变化,其中一维相关滤波模型如公式(4)所示。

在确定了当前第 t 帧图像的中心位置之后,利用一维的尺度相关滤波器去估计目标的尺度变化 z 。利用参数 S 表示尺度的数量可以得到下式:

$$n \in \left\{ \left\lceil -\frac{S-1}{2} \right\rceil, \dots, \left\lceil \frac{S-1}{2} \right\rceil \right\}. \quad (13)$$

通过设定参数 S 的大小并结合第 $t-1$ 帧目标尺度的大小,利用公式(14)可以得到一组在不同尺度下的目标样本。之后,应用一维相关滤波器对样本进行评估,得到最佳的目标尺度大小。

$$z = \alpha^T W \times \alpha^T H, \quad (14)$$

其中: $W \times H$ 代表第 $t-1$ 帧图像中红外目标的尺度, α 表示尺度因子。

3 OCS-LBP 特征

3.1 LBP 特征

LBP(Local Binary Pattern)即局部二值模式^[15],是一种用来描述局部特征的算子,具有对灰度变化不敏感和计算简单迅速等显著优点。为了适应不同尺度的纹理特征需求,利用圆形邻域代替传统的正方形邻域,计算方法如图 1 所示。像素局部区域用 (P, R) 来描述。 R 表示采样半径,代表中心像素与其相邻像素的距离, P 表示采样数目,代表邻域内像素的数目。

为了获取目标在不同尺度下的纹理特征,对 P 和 R 赋予不同的值即可:

$$LBP_{P,R}(y_c) = \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c) 2^p, \quad (15)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1 & x \geq T \\ 0 & x < T \end{cases}, \quad (16)$$

其中: g_c 代表中心像素 y_c 的灰度值大小,而 g_p 代表以 y_c 为中心,半径为 R 的圆上第 P 个等分点像素的灰度值大小。 T 是一个比较阈值,主要是用于降低噪声以及局部灰度变化的影响。

由式(15)可以得到以二进制模式描述的中心像素与相邻像素灰度值的比较结果并将结果通过

直方图的形式描述,得到图像的纹理特征。但由于原始 LBP 特征生成的直方图长度较长。因此研究人员对 LBP 特征进行不断的研究,产生了许多 LBP 的改进版本。

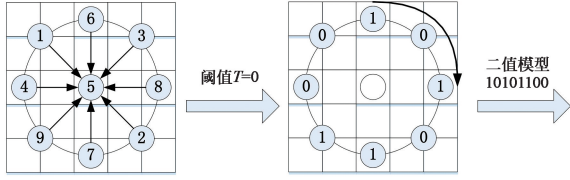


图 1 LBP 纹理特征 ($P = 8, R = 2$)

Fig.1 LBP texture feature ($P = 8, R = 2$)

3.2 OCS-LBP 特征

梯度直方图特征 (Histogram of Oriented Gradient, HOG) 是一种常用的描述目标图像的算子,是目标跟踪领域常见的特征。然而,由于红外图像的特性,往往会出现背景噪声较多或是相似目标混淆的情况,此时会对 HOG 特征产生干扰,使得其对红外目标描述能力变弱。局部二值模式 (LBP) 是一种常用的图像纹理特征,纹理特征不依赖于颜色和亮度,对红外图像的灰度变化及噪声具有较强的鲁棒性,能够有效地抑制目标背景的高频噪声,实现更为稳定的目标跟踪。但是,由于原始的 LBP 特征会生成很长的直方图,影响跟踪过程的计算速度,而且 LBP 特征不包含像素点的方向信息。因此,本文提出了一种新的低维 OCS-LBP^[16] 特征 (Oriented Center Symmetric Local Binary Patterns, 即方向中心对称的局部二值模式)。

相比于原始的 LBP 特征, OCS-LBP 特征简化了其计算过程,保持了其灰度不变性等特点,同时包含了像素点的梯度方向信息。图 2 为 OCS-LBP 特征的计算原理图。

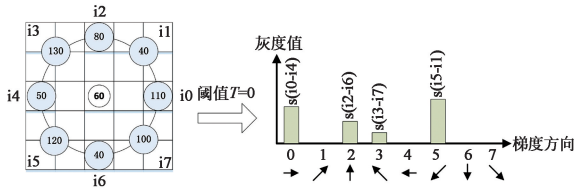


图 2 OCS-LBP 特征计算原理图

Fig.2 OCS-LBP feature calculation schematic

上述过程的数学描述式为:

$$s(x) = \begin{cases} x & x > T \\ 0 & x \leq T \end{cases}, \quad (17)$$

$$OCS-LBP_{R,P}^k(x_c, y_c) = s(n_i - n_{i+(P/2)})$$

$$[0 \leq i \leq (P/2) - 1, k = 0 \dots 3], \quad (18)$$

$$OCS-LBP_{R,P}^k(x_c, y_c) = s(n_i - n_{i-(P/2)})$$

$$[(P/2) - 1 < i < P, k = 4 \dots 7]. \quad (19)$$

在式(17)、(18)和(19)中, (x_c, y_c) 表示邻域中心点像素的坐标值, n_i 和 $n_{i+(P/2)}$ 与 n_i 和 $n_{i-(P/2)}$ 表示一组以 R 为半径,以 P 为等间隔,关于中心对称的一组像素的灰度值。 k 表示梯度方向,取值为 $0 \sim 7$ 的正整数。参数 T 是函数 $s(x)$ 的比较阈值,由实验效果来决定其具体的取值,一般设置为一个较小的正数。通过对阈值 T 的不同设定,以提升目标特征的鲁棒性。

图 2 为 OCS-LBP 计算原理图。从图中可以看出,梯度方向从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 被分为 8 个方向,每隔 45° 设置一个方向。梯度幅值可以通过计算关于中心对称的两个像素点的灰度值之差,并与阈值大小进行比较后确定。如式(18)和(19),梯度幅值的计算被分为两个部分。在式(18)中 k 的取值范围为 $0 \sim 3$,相当于 $0^\circ \sim 180^\circ$,每隔 45° 设置一个方向;式(19)中 k 的取值范围为 $4 \sim 7$,对应角度为 $180^\circ \sim 360^\circ$,每隔 45° 设置一个方向。当所在梯度方向关于中心对称的两个像素点差值大于阈值 T 时,则将差值记录在其对应梯度方向的直方图中。

例如,设定阈值 T 为 0, i_5 的灰度值为 120, i_1 的灰度值为 40,两者差值为 80,大于设定的阈值 T ,由公式(19)可知,在直方图中梯度方向 $k = 5$ 所对应的幅值大小为 80。

利用上述特征提取方法,将候选目标区域分割为多个子区域,对每一个子区域求取特征直方图。当每个子区域的像素点全部计算完成后,采用最小-最大归一化方法,获得特征矩阵。从特征提取原理可以看出,每个特征直方图中,既包含了梯度方向信息,同时又包含了梯度幅值信息。

4 测量实验与结果

为了评估本文提出算法的性能,利用 10 组不同的红外视频序列进行测试。测试数据集包括了目标遮挡、尺度变化、快速运动、背景复杂、杂波干扰、低分辨率等属性。同时,测试将基于核相关滤波算法 (KCF),通过与 HOG 特征、原始 LBP 特征、灰度特征作对比以验证本文提出的 OCS-LBP 特征的有效性。本文的实验平台为 Matlab

R2015b, 电脑参数配置为 Intel i5-7300HQ CPU, 主频 2.5 GHz, 内存 8 G。OCS-LBP 特征中参数半径 $R=2$, 间隔 $P=8$, 阈值 $T=1$ 。

4.1 定量分析

本文通过计算精确度、成功率和每秒平均帧数(FPS)3个指标来进行算法的性能评估。精确度是指在跟踪过程中目标框中心位置与真实目标中心位置之间的欧氏距离低于指定阈值的帧数占序列总帧数的百分比。精确度的阈值设为 20 个像素。成功率是指在跟踪过程中, 目标跟踪框与目标真实框重叠面积与总面积之比大于指定阈值的帧数占序列总帧数的百分比。成功率的阈值设为 0.5。每秒平均帧数则代表了跟踪器目标跟踪过程中的速度性能。

依据图 3 可以看出, 本文提出的 OCS-LBP 特征的平均精确度为 72.3%, 分别比 HOG 特征的 69.4%、原始 LBP 特征的 66.7%、GRAY 特征的 61.9% 提高了 2.9%、5.6% 和 10.4%。在平均成功率上, 本文提出的 OCS-LBP 特征的平均成功率为 68.0%, 分别比 HOG 特征的 58.1%、原始 LBP 特征的 55.0%、GRAY 特征的 43.8% 提高了 9.9%、13% 和 24.2%。同时, 根据表 1 可以看出本文提出的 OCS-LBP 特征在处理红外目标跟踪时速度上达到了 63.51 FPS, 相比于第二名算法提升了 14.15 FPS。

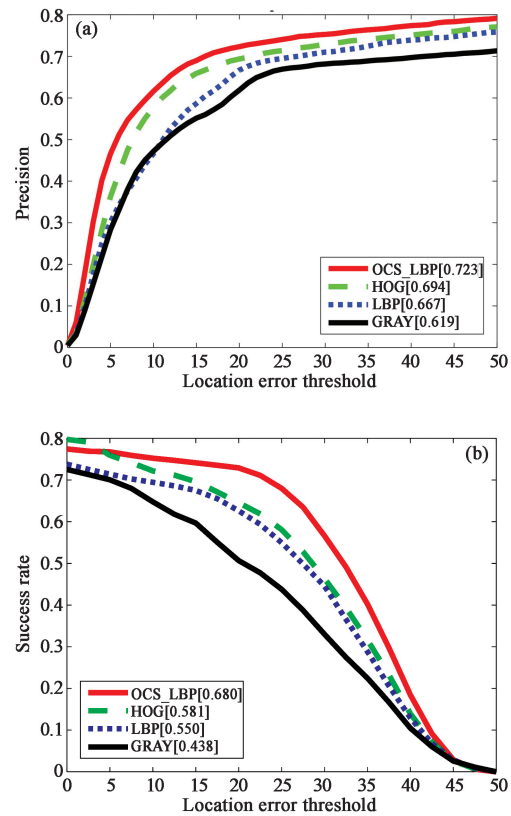


图 3 不同特征的 OPE 精确度曲线(a)和成功率曲线(b)(10 组红外视频序列)

Fig.3 Precision plots(a) and success rate plots(b) of OPE with different features (10 infrared sequences)

表 1 不同特征的跟踪性能比较(10 组红外视频序列)

Tab.1 Tracking performance comparison of different features (10 infrared sequences)

	GRAY	LBP	HOG	OCS-LBP
Mean FPS	49.36	36.54	42.86	63.51

4.2 定性分析

为了更好地验证本文所提出特征的性能, 分别测试 OCS-LBP 特征与灰度特征、LBP 特征、HOG 特征基于核相关滤波算法, 在不同属性的视频序列上的跟踪结果。如图 4 所示, 针对红外图像的不同情况, 分别对以上 4 种特征在 KCF 算法下的跟踪效果进行分析和比较。

序列(a): 在目标行人横穿公路的过程中, 由于公路背景与目标行人图像相似且存在杂波干扰, 在第 55 帧时, 除本文提出的特征外, 其他 3 种特征均发生了一定程度的漂移。在第 75 帧时, 本文提出的特征成功的跟踪了目标行人, 解决了红

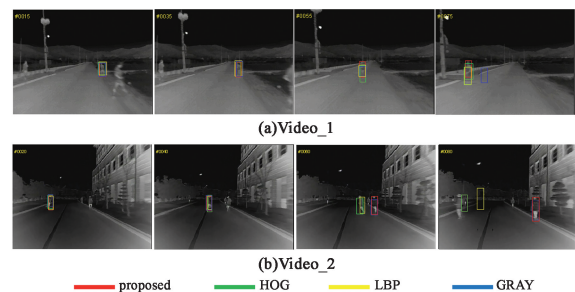


图 4 本文特征与其他三种特征跟踪结果展示图

Fig.4 Tracking results of the proposed features and other three features

外图像中背景复杂及杂波干扰的问题, 而 HOG

特征和 LBP 特征的跟踪框均产生了偏移,灰度特征则跟踪失败。

序列(b):第 60 帧时,从左向右的目标行人(在前)与从右向左的行人(在后)在图像中相遇并产生重叠,出现了相似目标。HOG 特征和 LBP 特征均跟踪失败脱离在前的目标行人,灰度特征虽然跟踪上了目标,但是产生了目标偏移。而本文提出的特征成功的跟踪上了目标行人,解决了红外图像中相似目标混淆的问题。

5 结 论

针对红外图像背景复杂、杂波干扰严重、相似目标混淆导致的目标跟踪丢失问题,本文基

于核相关滤波框架,提出了一种改进的纹理特征,即 OCS-LBP 特征。本文提出的特征简化了原始 LBP 特征的计算,提升了跟踪器的跟踪速度;与此同时保留了像素的梯度方向和幅值信息,较好地解决了因红外图像背景复杂、杂波干扰严重、相似目标混淆导致的目标跟踪丢失,提高了目标跟踪的准确性和鲁棒性。实验结果表明,相比于第二名算法精确度和成功率提高了 2.9% 和 9.9%。与此同时,本文提出的特征在处理速度上也有极大的提升,相比于第二名在速度上提升了 14.15 FPS,具有较好的实时性。由此说明了本文提出的特征优于传统特征,具有一定的研究和实用价值。

参 考 文 献:

- [1] LI Y, LI P C, SHEN Q. Real-time infrared target tracking based on ℓ_1 minimization and compressive features [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6518-6526.
- [2] HE Y J, LI M, ZHANG J L, *et al.* Infrared target tracking via weighted correlation filter [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 73: 103-114.
- [3] HUANG Y, ZHENG H, YANG H. Improving an object tracker for infrared flying bird tracking [C]// *Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Image Processing*. Phoenix: IEEE, 2016: 1699-1703.
- [4] 龚俊亮,何昕,魏仲慧,等.采用改进辅助粒子滤波的红外多目标跟踪[J].光学精密工程,2012,20(2):413-421.
GONG J L, HE X, WEI Z H, *et al.* Multiple infrared target tracking using improved auxiliary particle filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 413-421. (in Chinese)
- [5] 刘火平,孟维平,宋立维,等.红外图像序列中不均匀背景消除新方法[J].液晶与显示,2012,27(4):539-544.
LIU H P, MENG W P, SONG L W, *et al.* New method for eliminating non-uniformity background of IR images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 539-544. (in Chinese)
- [6] 江山,张锐,韩广良,等.复杂背景灰度图像下的多特征融合运动目标跟踪[J].中国光学,2016,9(3):320-328.
JIANG S, ZHANG R, HAN G L, *et al.* Moving object tracking based on multi-feature fusion in the complex background gray image [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 320-328. (in Chinese)
- [7] DANELLJAN M, KHAN F S, FELSBERG M, *et al.* Adaptive color attributes for real-time visual tracking [C]// *Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Columbus: IEEE, 2014: 1090-1097.
- [8] 毛宁,杨德东,杨福才,等.多特征融合的多模板协同相关跟踪[J].液晶与显示,2017,32(2):153-162.
MAO N, YANG D D, YANG F C, *et al.* Multi-template collaborative correlation tracking with multi-feature fusion [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(2): 153-162. (in Chinese)
- [9] 郭巴秋,许廷发,王洪庆,等.改进的粒子群优化目标跟踪方法[J].中国光学,2014,7(5):759-767.
GUO S Q, XU T F, WANG H Q, *et al.* Object tracking method based on improved particle swarm optimization [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 759-767. (in Chinese)
- [10] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.* High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583-596.
- [11] SCHÖLKOPF B, SMOLA A J. *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond* [M]. Cambridge: MIT Press, 2002: 2165-2176.
- [12] RIFKIN R, YEO G, POGGIO T. Regularized least-squares classification [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 190

- (1): 93-104.
- [13] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.* Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels [C]//*Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*. Florence: Springer, 2012: 702-715.
- [14] DANELLJAN M, HÄGER G, KHAN F S, *et al.* Accurate scale estimation for robust visual tracking [C]//*Proceedings of 2014 British Machine Vision Conference*. Nottingham: BMVA, 2014: 65.1-65.11.
- [15] OJALA T, PIETIKÄINEN M, MÄENPÄÄ T. Multiresolution 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.
- [16] KWAK J Y, KO B C, NAM J Y. Pedestrian tracking using online boosted random ferns learning in far-infrared imagery for safe driving at night [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(1): 69-81.

作者简介: 卢杨(1993—),男,天津市人,硕士研究生,2016年于河北工业大学获得学士学位,主要从事机器视觉、目标跟踪方面的研究。E-mail: 460280163@qq.com

张磊(1977—),男,天津市人,教授,硕士生导师,1999年于南开大学获得学士学位,2005年于北京航空航天大学获得博士学位(硕博连读),主要从事智能控制和图像处理的研究。E-mail: zhanglei@hebut.edu.cn