

文章编号:1001-9014(2011)02-0142-07

基于核 Rayleigh 商二次相关滤波器的红外目标检测

吴燕茹, 程咏梅, 赵永强, 高仕博
(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

摘要: Rayleigh 商二次相关滤波器(RQQCF)是一种重要的目标检测方法,但其直接对原始图像数据进行操作,目标检测效果不总是很理想.核方法可以描述图像的高阶统计特性,有效抑制噪声及杂波,提高目标检测效果.将 Rayleigh 商二次相关滤波器映射到高维核特征空间,完整推导核 Rayleigh 商二次相关滤波器(KRQQCF),提出用核特征提取方法解决其实现问题,并将算法用到红外目标检测中.实验中以核主成分分析(KPCA)特征提取方法为例,用真实场景下采集的红外数据对 KRQQCF 的性能进行检验,结果表明 KRQQCF 的性能明显高于 RQQCF,该方法能实现对红外目标的准确检测,是一种有效的红外目标检测方法.

关键词: 核 Rayleigh 商二次相关滤波器; Rayleigh 商二次相关滤波器; 红外目标检测; 核主成分分析
中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Infrared target detection using kernel Rayleigh quotient quadratic correlation filter

WU Yan-Ru, CHENG Yong-Mei, ZHAO Yong-Qiang, GAO Shi-Bo
(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Rayleigh quotient quadratic correlation filter (RQQCF) is an important technique for target detection. Since it operates directly on image data, satisfying results can't be always achieved when it is used in infrared target detection. Higher-order statistical properties of the image can effectively suppress the noise and clutter and improve the detection results which can be realized by means of kernel method in kernel space. In this paper, kernel Rayleigh quotient quadratic correlation filter (KRQQCF) was developed by extending RQQCF to the higher-dimensional space, i. e., the kernel space. Though the derivation was completed, this kernel filter couldn't be achieved directly. Kernel feature extraction method was proposed to settle this problem. The algorithm was used to detect infrared targets, and kernel principal component analysis (KPCA) was adopted to obtain this KRQQCF in experiments. Experimental results using real-life infrared images confirm the excellent performance of KRQQCF, and that KRQQCF outperforms RQQCF significantly in infrared target detection. Consequently, KRQQCF is an effective method for infrared target detection and can achieve accurate detection results.

Key words: kernel Rayleigh quotient quadratic correlation filter; Rayleigh quotient quadratic correlation filter; infrared small targets detection; kernel principal component analysis(KPCA)

PACS: 42.30.Tz

引言

红外目标检测技术被广泛应用于军事及民用领域,受到各国的广泛关注.将目标检测问题转化为目标与背景的分类问题在红外目标检测中得到大量应用,这类方法常使用模式识别的方法,如 Khan J F 等^[1]提出使用概率神经网络来检测 FLIR 图像中的

目标.目前,二次相关滤波器被广泛应用到红外目标检测中^[2~5],该方法运算简单、计算速度快. Fukunaga - Koontz 变换(FKT)和 Rayleigh 商是设计二次相关滤波器的两种重要方法, Mahalanobis 等^[6]用 Fukunaga - Koontz 变换(FKT)来检测目标, Liu R 等^[2]将 FKT 推广到核空间,成为核 FKT,并用其来检测红外小目标,得到了比 FKT 更好的检测性能.

收稿日期:2010-03-23,修回日期:2010-12-16

Received date: 2010-03-23, revised date: 2010-12-16

基金项目:国家自然科学基金(60634030,60602056);高等学校博士学科点专项科研基金(20060699032);航空科学基金(2007EC53037)

作者简介:吴燕茹(1985-),女,陕西西安人,硕士,主要研究方向为红外目标检测、跟踪及识别, E-mail: wuyanru.nwpu@163.com.

Huo X 等^[7]证明了当两类的混合分布是高斯分布时,FKT 是最优检测器的一种低秩逼近,但此方法对最大化分离度量不明确.针对实际中目标与背景分布是非高斯的,Mahalanobis 等^[8,9]使用 Rayleigh 商来设计二次相关滤波器,得到 Rayleigh 商二次相关滤波器(Rayleigh Quotient Quadratic Correlation Filter,RQQCF).该滤波器最优化了类分离指标,获得比 FKT 方法性能更好的二次相关滤波器,但实验发现 RQQCF 在一些情况下不能获得令人满意的检测结果,原因是它直接对原始图像数据进行检测.核方法是一种在高维核空间中处理问题的方法,它可以描述图像的高阶统计特性,有效抑制噪声及杂波,对提高目标检测效果有重要的作用,基于此,我们引入核空间来解决红外图像目标检测问题,将 RQQCF 推广到高维核空间,成为核 Rayleigh 商滤波器(Kernel Rayleigh Quotient Quadratic Correlation Filter,KRQQCF),推导出了 KRQQCF 的理论公式,通过核特征提取方法解决该核滤波器的实现问题,实验中以 KPCA 特征提取方法为例,用真实场景下采集的红外数据对 KRQQCF 的性能进行检验,实验结果表明,KRQQCF 可以有效检测出红外目标,KRQQCF 的性能明显高于 RQQCF.

1 Rayleigh 商二次相关滤波器(RQQCF)

设输入信号 $\mathbf{x} = [x(0), \dots, x(N-1)]^T$,它是目标 $\omega_1 (\mathbf{x} \in \omega_1)$ 或是背景 $\omega_2 (\mathbf{x} \in \omega_2)$. 假设存在系数矩阵 \mathbf{T} ,定义输出信号

$$y = \mathbf{x}^T \mathbf{T} \mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_{ij} x(i) x(j) \quad (1)$$

当 $\mathbf{x} \in \omega_1$ 时,输出 y 尽可能大; $\mathbf{x} \in \omega_2$ 时, y 尽可能小,那么满足以上条件的 \mathbf{T} 就称为二次滤波器(Quadratic Filter,QF).一般的二次相关滤波器的系数矩阵 \mathbf{T} 是方阵,除此没有其它的限制.

设二次相关滤波器的系数为

$$\mathbf{T} = \sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^T, \quad 1 \leq i \leq M \quad (2)$$

\mathbf{q}_i 是线性独立的单位向量,对任意的输入向量 \mathbf{x} ,QCF 输出结果为

$$\varphi = \mathbf{x}^T \mathbf{T} \mathbf{x} \quad (3)$$

对于两类分类问题, $\mathbf{x} \in \omega_1, \mathbf{y} \in \omega_2$,则两类之间的距离为

$$\begin{aligned} E_1 \{ \varphi_1 \} - E_2 \{ \varphi_2 \} &= E_1 \{ \mathbf{x}^T (\sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^T) \mathbf{x} \} - E_2 \{ \mathbf{y}^T (\sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i \mathbf{q}_i^T) \mathbf{y} \} \\ &= \sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i^T E_1 \{ \mathbf{x} \mathbf{x}^T \} \mathbf{q}_i - \sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i^T E_2 \{ \mathbf{y} \mathbf{y}^T \} \mathbf{q}_i \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i^T (R_1 - R_2) \mathbf{q}_i \quad (4)$$

$R_1 = E_1 \{ \mathbf{x} \mathbf{x}^T \}, R_2 = E_2 \{ \mathbf{y} \mathbf{y}^T \}, R_1, R_2$ 为对称阵,选取 \mathbf{q}_i 使得

$$\begin{aligned} J(\mathbf{q}) &= \frac{E_1 \{ \varphi \} - E_2 \{ \varphi \}}{E_1 \{ \varphi \} + E_2 \{ \varphi \}} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i^T (R_1 - R_2) \mathbf{q}_i}{\sum_{i=1}^M \mathbf{q}_i^T (R_1 + R_2) \mathbf{q}_i} \quad (5) \end{aligned}$$

取得最大值,这样做的目的是使两类之间的距离尽量大,同时使输出值的分散程度尽可能小.为了求取 \mathbf{q}_i ,对式(5)两端 \mathbf{q}_j 求导,则可得到 $J(\mathbf{q})$ 是式(6)的特征值.

$$A \mathbf{q}_i = \lambda_i B \mathbf{q}_i \quad (6)$$

其中 $A = R_1 - R_2, B = R_1 + R_2$,可以证明^[8], $J(\mathbf{q}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i$,要使 $J(\mathbf{q})$ 最大,则应选取前 N_λ 个最大的特征值及其所对应的特征向量 $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_{N_\lambda}$. 这样就得到了 \mathbf{T} ,完成了二次相关滤波器的设计.

2 核 Rayleigh 商二次相关滤波器(KRQQCF)

将 RQQCF 推广到高维核空间,成为核 Rayleigh 商滤波器(KRQQCF).

设 $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^d$,非线性映射 $\phi: \mathfrak{R}^d \rightarrow \mathfrak{R}^D, D > d$,可取无穷大,样本集 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_s}\}$ 通过此非线性映射后为 $\Phi_{D \times N} = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{N_s}\}$,定义核二次相关滤波器的输出为

$$\hat{y} = \phi(\mathbf{x})^T \hat{\mathbf{T}} \phi(\mathbf{x}) \quad (7)$$

设在核空间的二次相关滤波器为

$$\hat{\mathbf{T}} = \sum_{i=1}^M (U_m \mathbf{p}_i) (U_m \mathbf{p}_i)^T \quad (8)$$

其中 $U_m = [u_1, u_2, \dots, u_m] \in \mathbf{R}^{D \times m}, \mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})^T$.

在核空间中, $\varphi(\mathbf{x}) \in \omega_1, \varphi(\mathbf{y}) \in \omega_2$,则两类之间的距离为

$$\begin{aligned} &E_1 \{ \phi_1 \} - E_2 \{ \phi_2 \} \\ &= E_1 \{ \phi(\mathbf{x})^T (\sum_{i=1}^M U_m \mathbf{p}_i (U_m \mathbf{p}_i)^T) \phi(\mathbf{x}) \} \\ &\quad - E_2 \{ \phi(\mathbf{y})^T (\sum_{i=1}^M U_m \mathbf{p}_i (U_m \mathbf{p}_i)^T) \phi(\mathbf{y}) \} \\ &= \sum_{i=1}^M E_1 \{ \phi(\mathbf{x})^T U_m \mathbf{p}_i (U_m \mathbf{p}_i)^T \phi(\mathbf{x}) \} \\ &\quad - \sum_{i=1}^M E_2 \{ \phi(\mathbf{y})^T U_m \mathbf{p}_i (U_m \mathbf{p}_i)^T \phi(\mathbf{y}) \} \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^M (U_m \mathbf{p}_i)^T E_1 \{ \phi(\mathbf{x}) \phi(\mathbf{x})^T \} (U_m \mathbf{p}_i) - \sum_{i=1}^M (U_m \mathbf{p}_i)^T E_2 \{ \phi(\mathbf{y}) \phi(\mathbf{y})^T \} (U_m \mathbf{p}_i) \quad (9)$$

令

$$\tilde{R}_1 = E_1 \{ \varphi(\mathbf{x}) \varphi(\mathbf{x})^T \} \quad (10)$$

$$\tilde{R}_2 = E_2 \{ \varphi(\mathbf{y}) \varphi(\mathbf{y})^T \} \quad (11)$$

因为式(10)、式(11)无法直接计算,因此我们将式(9)重写为

$$E_1 \{ \varphi_1 \} - E_2 \{ \varphi_2 \} = \sum_{i=1}^M E_1 \{ (U_m^T \phi(\mathbf{x}))^T \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i^T (U_m^T \phi(\mathbf{x})) \} - \sum_{i=1}^M E_2 \{ (U_m^T \phi(\mathbf{y}))^T \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i^T (U_m^T \phi(\mathbf{y})) \} \quad (12)$$

记

$$\hat{\mathbf{x}} = U_m^T \phi(\mathbf{x}) \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = U_m^T \phi(\mathbf{y}) \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(12),可得

$$E_1 \{ \hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}^T \} - E_2 \{ \hat{\mathbf{y}} \hat{\mathbf{y}}^T \} = \sum_{i=1}^M E_1 \{ \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{x}} \} - \sum_{i=1}^M E_2 \{ \hat{\mathbf{y}}^T \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{y}} \} = \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T E_1 \{ \hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}^T \} \mathbf{p}_i - \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T E_2 \{ \hat{\mathbf{y}} \hat{\mathbf{y}}^T \} \mathbf{p}_i = \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T \hat{R}_1 \mathbf{p}_i - \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T \hat{R}_2 \mathbf{p}_i \quad (15)$$

其中

$$\hat{R}_1 = E_1 \{ \hat{\mathbf{x}} \hat{\mathbf{x}}^T \} = \frac{1}{N_{s1}} \sum_{i=1}^{N_{s1}} \hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i^T \quad (16)$$

$$\hat{R}_2 = E_2 \{ \hat{\mathbf{y}} \hat{\mathbf{y}}^T \} = \frac{1}{N_{s2}} \sum_{i=1}^{N_{s2}} \hat{\mathbf{y}}_i \hat{\mathbf{y}}_i^T \quad (17)$$

N_{s1}, N_{s2} 分别是正样本数与负样本数, \hat{R}_1, \hat{R}_2 为对称阵,则

$$J(\mathbf{p}) = \frac{E_1 \{ \phi \} - E_2 \{ \phi \}}{E_1 \{ \phi \} + E_2 \{ \phi \}} = \frac{\sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T (\hat{R}_1 - \hat{R}_2) \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T (\hat{R}_1 + \hat{R}_2) \mathbf{p}_i} \quad (18)$$

同上面推导,对式(18)两端的 \mathbf{p}_i 求导,可以得到 $J(\mathbf{p})$ 是式(19)的特征值.

$$\hat{A} \mathbf{p}_i = \lambda_i \hat{B} \mathbf{p}_i \quad (19)$$

其中 $\hat{A} = \hat{R}_1 - \hat{R}_2, \hat{B} = \hat{R}_1 + \hat{R}_2$, 同样要使 $J(\mathbf{p})$ 最大, 则应选取前 M 个最大的特征值及其所对应的特征向量 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_M$. 这样就得到了 \hat{T} , 完成了二次相关滤波器的设计, 我们称为 KRQOCF.

$$\hat{T} = \sum_{i=1}^M (U_m \mathbf{p}_i) (U_m \mathbf{p}_i)^T \quad (20)$$

对于待检测样本 \mathbf{z} , 将其映射到核空间后为 $\phi(\mathbf{z})$, 由式(7)可得该样本的输出为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}} &= \phi(\mathbf{z})^T \hat{T} \phi(\mathbf{z}) \\ &= \phi(\mathbf{z})^T \left(\sum_{i=1}^M (U_m \mathbf{p}_i) (U_m \mathbf{p}_i)^T \right) \phi(\mathbf{z}) \\ &= \sum_{i=1}^M \phi(\mathbf{z})^T (U_m \mathbf{p}_i) (U_m \mathbf{p}_i)^T \phi(\mathbf{z}) \\ &= \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T U_m^T \phi(\mathbf{z}) (U_m^T \phi(\mathbf{z}))^T \mathbf{p}_i \\ &= \sum_{i=1}^M \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{z}} \hat{\mathbf{z}}^T \mathbf{p}_i \\ &= \sum_{i=1}^M \hat{\mathbf{z}}^T \mathbf{p}_i \mathbf{p}_i^T \hat{\mathbf{z}} \quad (21) \end{aligned}$$

其中

$$\hat{\mathbf{z}} = U_m^T \phi(\mathbf{z}) \quad (22)$$

以上只是完成了 KRQOCF 的理论推导, 并没有考虑实现问题, 因为式(13)、式(14)及式(22)中的 U_m 与 $\phi(\cdot)$ 不确定, 则该滤波器是无法实现的, 但只要可以计算出 $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ 及 $\hat{\mathbf{z}}$ 后, 该滤波器就可以实现. 将 U_m 看作是核空间的变换矩阵, 实际上可以认为是一种特征提取方法, 任何适当的核特征提取方法都可以解决该 KRQOCF 的实现问题. 文献[10]给出了计算 KPCA 特征的方法, 样本 $\phi(\hat{\mathbf{z}})$ 的 KPCA 特征向量为^[10]

$$\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_m)^T = U_m^T \phi(\mathbf{x}) \quad (23)$$

每个分量为

$$\begin{aligned} \hat{x}_j &= u_j^T \phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} v_j^T \Phi^T \phi(\mathbf{x}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} v_j^T [k(x_1, x), k(x_2, x), \dots, k(x_{N_s}, x)]^T, \\ & \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (24) \end{aligned}$$

U_m 是特征空间中样本的协方差阵的前 m 个主特征值对应的特征向量构成的矩阵, $U_m = [u_1, u_2, \dots, u_m]$, λ_j, v_j 是核矩阵 $\mathbf{K} = (K = \Phi^T \Phi)$ 中心化后的矩阵 $\bar{\mathbf{K}} \left(\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} - 1_{N_s}, \mathbf{K} - \mathbf{K} \mathbf{1}_{N_s} \mathbf{1}_{N_s}^T, \mathbf{1}_{N_s} = \left(\frac{1}{N_s} \right)_{N_s \times N_s} \right)$ 的前 m 个特征值及特征向量. 为了抑制背景及其它干扰, 这里我们将式(14)及式(22)中 $\phi(\mathbf{y}), \phi(\mathbf{z})$ 的特征量定义为其相对于目标训练集的 KPCA 特征向量, 即 Φ 仅由目标样本构成, 这样可以使式(21)对目标输出较大.

3 算法实现

将 RQQCF 映射到核空间,理论上完整地推导出了核滤波器,通过核特征提取方法可以解决该核滤波器实现的问题,以 KPCA 特征提取为例,给出 KRQQCF 算法的推导及实现过程.图 1(a)、图 1(b)给出了算法理论结构图与实际实现的算法流程图.

由图 1 我们可以得出实现算法的具体步骤如下:

(1) 将目标和背景的训练图像按行拉直为一维向量(假设训练图像的维数是 $d = r \cdot c$),分别得到长度维样本向量: $\{x_1, x_2, \dots, x_{N_{s1}}\}$, $\{y_1, y_2, \dots,$

$y_{N_{s2}}\}$, N_{s1}, N_{s2} 分别是目标样本与背景样本数量,并将其映射到高维核空间,表示为 $\{\varphi(x_1), \varphi(x_2), \dots, \varphi(x_{N_{s1}})\}$, $\{\varphi(y_1), \varphi(y_2), \dots, \varphi(y_{N_{s2}})\}$.

(2) 对目标与背景按照式(13)、式(14)计算其 KPCA 特征,得到 $\{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{N_{s1}}\}$, $\{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_{N_{s2}}\}$,在这里应该注意目标与背景选取的核主成分数相同,按照式(16)、式(17)计算 \hat{R}_1, \hat{R}_2 ,求解式(19)得到 p_1, p_2, \dots, p_M ,这里涉及两个参数的选择:核主成分数 m 与式(19)的特征值的个数 M .

(3) 从待检测的目标图像中依次选取和训练图像尺寸相同的子图像,将这些子图像按行拉直为一维向量 $\{z_1, z_2, \dots, z_{N_z}\}$, N_z 是子图像的数量,将其映射到高维核空间,记为 $\{\phi(z_1), \phi(z_2), \dots, \phi(z_{N_z})\}$,然后按照式(22)计算其 KPCA 特征量 $\{\hat{z}_1, \hat{z}_2, \dots, \hat{z}_{N_z}\}$.

(4) 按照式(21)计算滤波器的输出,选取一定阈值 ε ,如果滤波器输出值大于 ε ,就认为相应输出对应的子图像为检测到的目标.

4 实验结果及分析

核 Rayleigh 商二次相关滤波器是在核空间进行的目标检测,与 RQQCF 相比,首先具有核空间与生俱来的一些优势,比如可以提取样本的非线性特征,即获取样本的高阶特征;另一方面,引入高维核空间,可以有效抑制噪声对检测结果的影响,而 RQQCF 直接在原始输入的图像数据上进行操作,没有特征提取.为了验证文中算法的有效性,采用 8 ~ 14 μm 长波红外热像仪拍摄的实际红外图像进行实验,选取了 3 组实验.实验 1、2 的拍摄距离为 400m.实验 3 是将直径为 10cm 的铁块作为目标,背景为杂乱的草地,拍摄距离 70m,分别选其中一部分图像作为训练样本,图 2 给出了目标的部分训练样本图像.核函数选 Gauss 核, $K(x, x') = \exp(-\|x - x'\|^2/\sigma^2)$,经实验验证,选取的仿真参数见表 1.实际在算法参数选择方面,理论上核主成分数 m 小于样本数,即 $m \leq \min(N_{s1}, N_{s2})$,但实际可以取相对于样本数很小的值,式(19)的特征值的个数 $M \leq m$,选取时只要选取前 M 个大于零的特征值就可以了,还可以选择更少的,检测结果都比较满意.检测阈值 ε ,通常可以选为一个很小的正数,还可以选为 $\varepsilon = \eta \cdot \max(\hat{y}_i)$, $0 < \eta \leq 1, i = 1, \dots, N_{size}, N_{size}$ 是待检测图像的输出总数.采用 MATLAB 7.5,在 3.0 GHz CPU/2G 内存下仿真实验,待检测图像均为 200×200 ,在每种实验场景下,对多帧图像进行了测试,

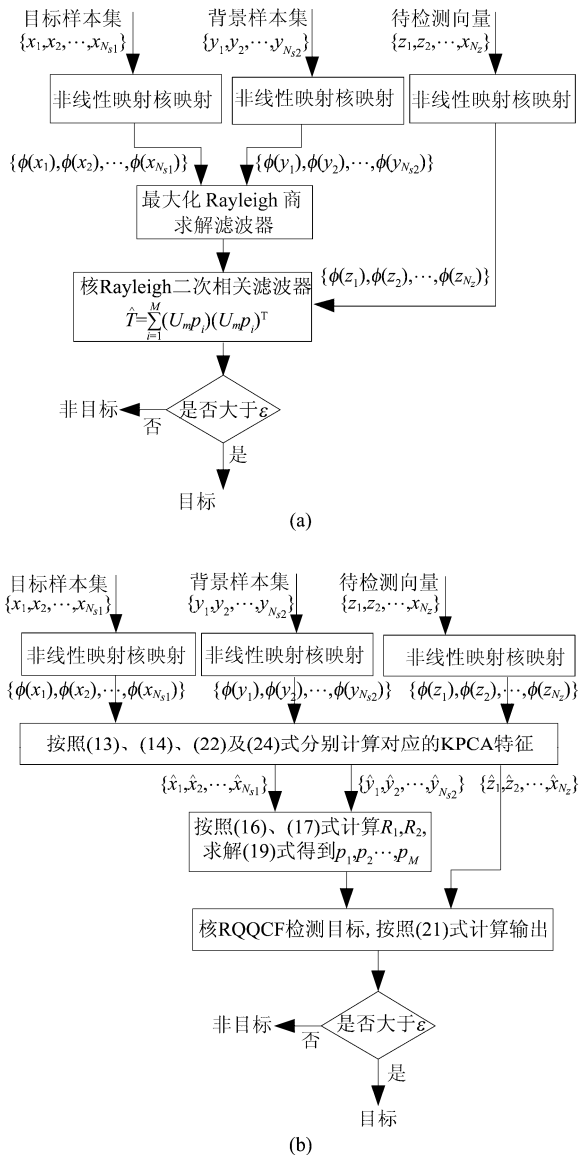


图 1 文中算法的理论结构图与实现流程图 (a) 理论结构图 (b) 实现流程图

Fig. 1 The theoretical structure and realization flow chart of the algorithm presented (a) the theoretical structure (b) the realization flow chart

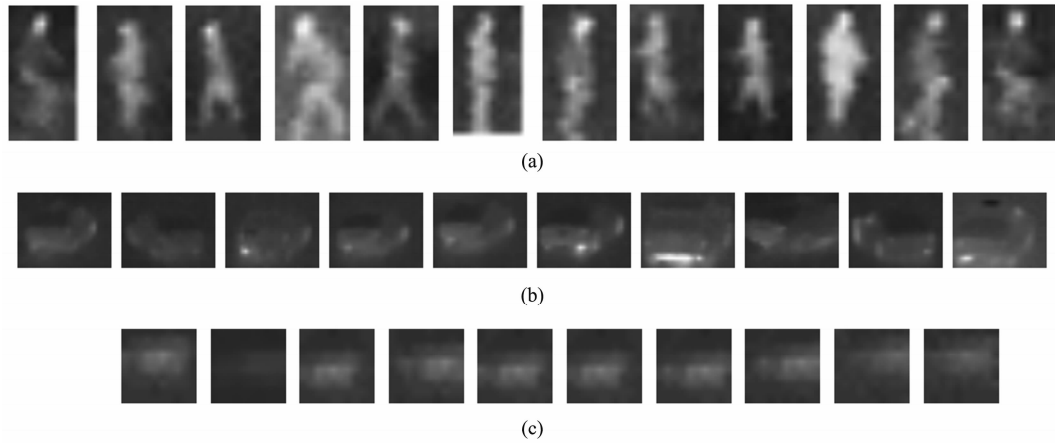


图2 目标训练样本图像 (a) 行人 (b) 车辆 (c) 铁块
Fig. 2 The training samples of the target (a) pedestrians (b) cars (c) the iron block

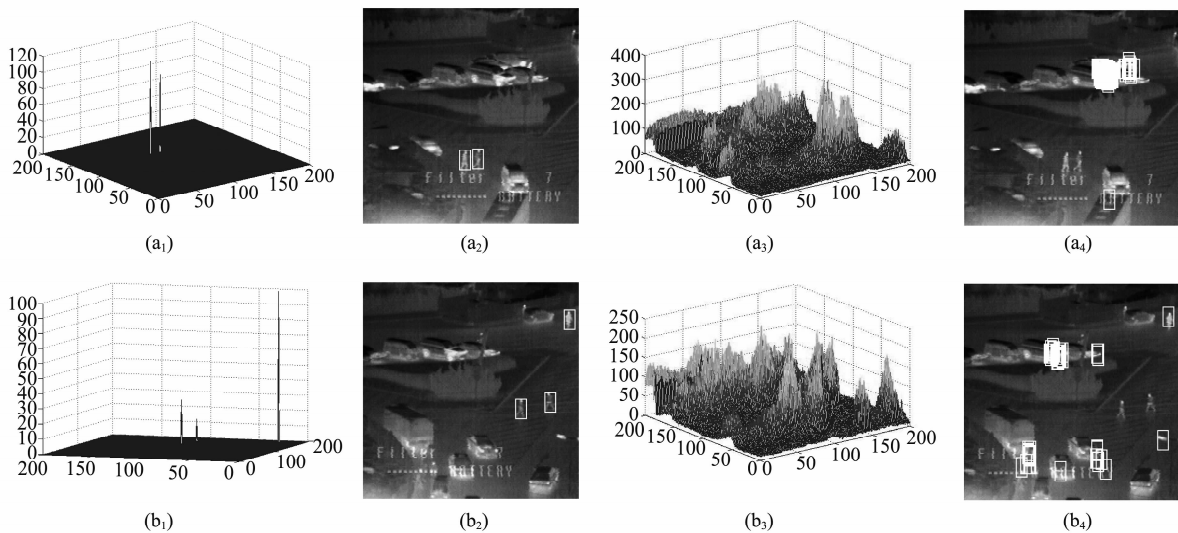


图3 行人目标检测结果 $(a_1), (a_2), (b_1), (b_2)$ 是文中 KRQCF 算法的检测结果, $(a_3), (a_4), (b_3), (b_4)$ 是 RQCF 的检测结果
Fig. 3 The detection results of the pedestrian $(a_1), (a_2), (b_1)$ and (b_2) are the detection results of KRQCF presented. $(a_3), (a_4), (b_3)$ and (b_4) are the results of RQCF

图3,图4,图5分别给出了目标为行人、车辆及铁块时 KRQCF 算法与 RQCF 算法的多组检测结果. 其中每组结果的第一列与第三列分别显示了 KRQCF 与 RQCF 在每个位置的输出值, 第二列与第四列给出了对应的目标检测结果, 检测出的目标均用白框标出. 对比图3 (a_1) 与 (a_3) , (b_1) 与 (b_3) , 图4 (a_1) 与 (a_3) , (b_1) 与 (b_3) , 图5 (a_1) 与 (a_3) , 可以看出文中提出的 KRQCF 检测算法输出的目标位置更准确, 只在目标处有大的输出值, 能够很好地实现对红外目标的准确检测, 而 RQCF 算法使目标被淹没在背景中, 无法检测出目标. 另外, RQCF 算法将图像中的一些干扰信号也检测成目标, 如在图3 (a_4) , 图3 (b_4) 中, 拍摄的红外图像上面

的白色字母也被检测为目标. 在检测算法耗时方面, 本文将核特征提取离线计算, 这样两种方法的检测时间相当, 约为 0.4s.

接收机工作特性曲线(ROC)常被用来评价检

表1 实验仿真参数

Table 1 Parameters for experimental simulation

	实验1	实验2	实验3
目标尺寸	19 * 11	20 * 25	10 * 10
正样本数	244	135	65
负样本数	250	100	60
核窗宽大小	100	100	50
核主成分数	100	90	50
特征值个数	60	60	40

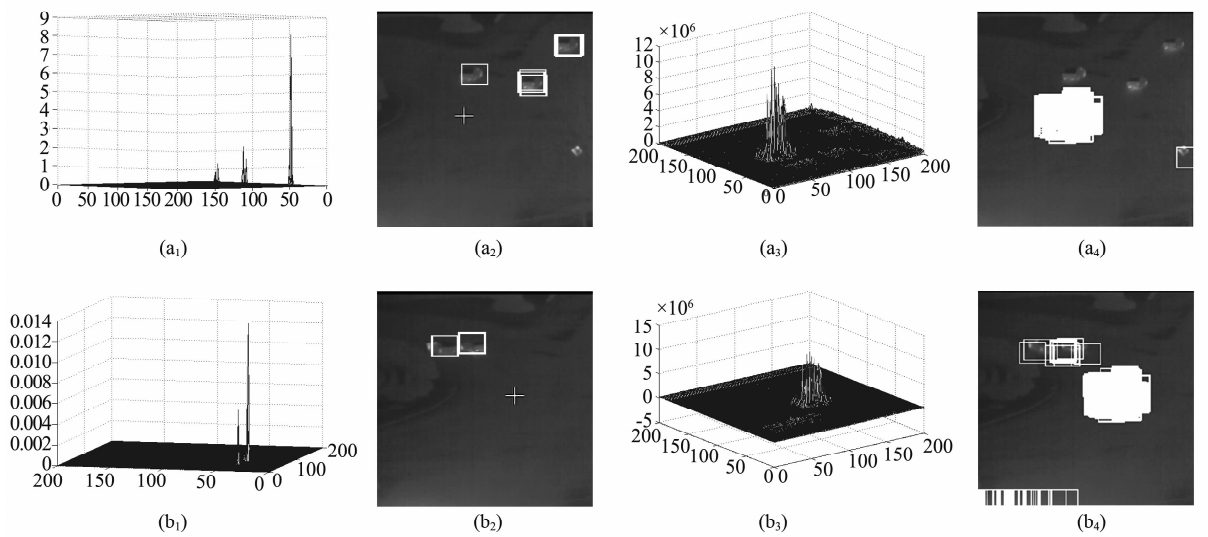


图4 车辆目标检测结果(a₁), (a₂), (b₁), (b₂)是文中 KRQCF 算法的检测结果, (a₃), (a₄), (b₃), (b₄)是 RQQCF 的检测结果
 Fig. 4 The detection results of the car (a₁), (a₂), (b₁) and (b₂) are the detection results of KRQCF presented. (a₃), (a₄), (b₃) and (b₄) are the results of RQQCF

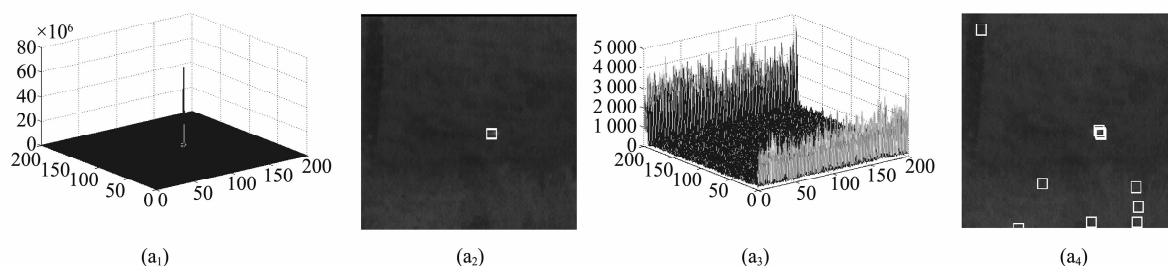


图5 铁块目标检测结果(a₁), (a₂), (b₁), (b₂)是文中 KRQCF 算法的检测结果, (a₃), (a₄), (b₃), (b₄)是 RQQCF 的检测结果
 Fig. 5 The detection results of the iron (a₁), (a₂), (b₁) and (b₂) are the detection results of KRQCF presented. (a₃), (a₄), (b₃) and (b₄) are the results of RQQCF

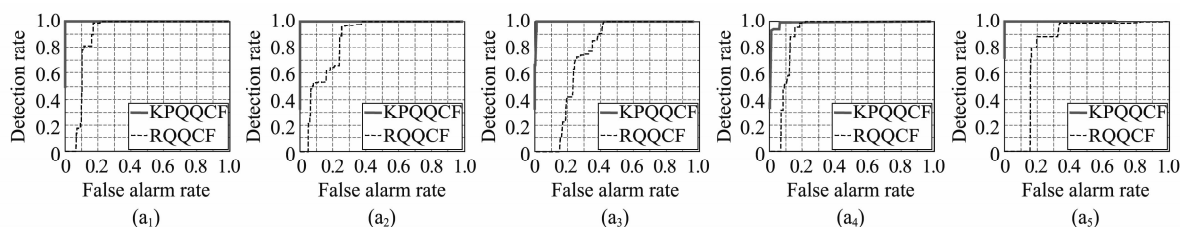


图6 各组实验中 KRQCF 与 RQQCF 的 ROC 曲线
 Fig. 6 Comparison of the ROC curves of KRQCF and RQQCF for the above experiments

测算法的性能,它描述了检测率和虚警率之间的相互关系,曲线越靠左上方,检测算法性能越好.图6给出了3个实验的 ROC 曲线,依次对应图3,图4及图5各组结果中 KRQCF 与 RQQCF 的 ROC 曲线.可以看出, KRQCF 的 ROC 曲线接近理想曲线,在相同的虚警率下, KRQCF 的检测率高于 RQQCF,说明文中提出的 KRQCF 性能明显好于 RQQCF.

5 结论

将 Rayleigh 商二次相关滤波器(RQQCF)映射到高维核特征空间,完整地推导出了核 Rayleigh 商二次相关滤波器(KRQCF),提出通过核特征提取方法解决该核滤波器实现的问题,以 KPCA 特征提取为例,给出 KRQCF 算法的实现过程,大量的实

验表明该方法能实现对红外目标的准确检测. 本质上, 该 KRQCF 算法是适当的特征提取方法与二次相关滤波器在核空间的结合, 因此核 Rayleigh 商二次相关滤波器结构具有一定的普适性, 可以与多种方法相结合, 在以后工作中, 将研究提高 KRQCF 算法的实时性, 以将其应用到序列目标检测中.

REFERENCES

- [1] Khan J F, Alam M S, Bhuiyan S. Automatic target detection in forward-looking infrared imagery via probabilistic neural networks [J]. *Applied Optics*, 2009, **48** (3): 464—476.
- [2] Liu R, Liu E, Yang J, *et al.* Infrared small target detection with kernel Fukunaga-Koontz transform [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18** (9): 3025—3035.
- [3] Ragothaman P, Mikhael W B, Muise R, *et al.* Adaptive determination of eigenvalues and eigenvectors from perturbed autocorrelation matrices for automatic target recognition [J]. *Proc. SPIE*, 2006, **6234**: 62340F.
- [4] Ragothaman P, Mahalanobis A, Muise R, *et al.* A performance comparison of the transform domain Rayleigh quotient quadratic correlation filter (TDRQCF) approach to the regularized RQCF [J]. *Proc. SPIE*, 2008, **6967**: 69670P.

- [5] Mikhael W B, Ragothaman P, Muise R, *et al.* An efficient quadratic correlation filter for automatic target recognition [J]. *Proc. SPIE*, 2007, **6566**: 65660W.
- [6] Mahalanobis A, Muise R R, Stanfill S R, *et al.* Design and application of quadratic correlation filters for target detection [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, **40** (3): 837—850.
- [7] Huo X, Elad M, Flesia A G, *et al.* Optimal reduced-rank quadratic classifiers using the Fukunaga-Koontz transform with applications to automated target recognition [J]. *Proc. SPIE*, 2003, **5094**: 59—72.
- [8] Mahalanobis A, Muise R R, Stanfill S R. Quadratic correlation filter design methodology for target detection and surveillance applications [J]. *Applied optics*, 2004, **43** (27): 5198—5205.
- [9] Sims S, Mahalanobis A. Performance evaluation of quadratic correlation filters for target detection and discrimination in infrared imagery [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43** (8): 1705.
- [10] Jian Y, Frangi A F, Jing-Yu Y, *et al.* KPCA plus LDA: a complete kernel Fisher discriminant framework for feature extraction and recognition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27** (2): 230—244.

(上接 141 页)

REFERENCES

- [1] Liu Y, Si X, Jiao S, *et al.* Study of detection algorithm for infrared small target [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, **28** (1): 53—55.
- [2] Vandewalle P, Susstrunk S, Vetterli M. A frequency domain approach to registration of aliased images with application to super-resolution [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2006, **2006**: 1—14.
- [3] Marcel B, Briot M, Murrieta R. Calcul de translation et rotation par la transformation de Fourier [J]. *TS. Traitement du signal*, 1997, **14** (2): 135—149.
- [4] Lucchese L, Cortelazzo G. A noise-robust frequency domain technique for estimating planar roto-translations [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, **48** (6): 1769—1786.
- [5] Keren D, Peleg S, Brada R. Image sequence enhancement using sub-pixel displacements [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1988, 742—746.

- [6] Freeman W, Jones T, Pasztor E. Example-based super-resolution [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, **22** (2): 56—65.
- [7] Simon B, Takeo K. Super resolution optical flow [R]. *Tech. report CMU-RI-TR-99-36*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, October, 1999.
- [8] Zhao W, Sawhney H. Is super-resolution with optical flow feasible? [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, **2350**: 599—613.
- [9] Felzenszwalb P, Huttenlocher D. Efficient belief propagation for early vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, **70** (1): 41—54.
- [10] Liu C, Yuen J, Torralba A. SIFT Flow: Dense correspondence across scenes and its applications [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **PP** (99): 1—1.
- [11] Engin T, Lepetit V, Pascal F. Daisy: An efficient dense descriptor applied to wide baseline stereo [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32** (5): 815—830.