

文章编号: 1672-8785(2021)10-0033-12

基于可变阈值和坐标变换融合的红外 刑侦重叠手印目标提取算法

李俊芳^{1,2} 李凯臣^{1,2} 于 晓^{1,2*}

(1. 天津理工大学电气工程与自动化学院, 天津 300384;

2. 天津市复杂系统控制理论与应用重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 红外重叠手印图像是刑侦领域比较复杂的一类红外图像, 其本身具有信息不确定性和手印重叠性。如何准确提取重叠的手印目标是刑侦领域处理此类图像的一大难题。针对该问题, 提出了一种基于可变阈值和坐标变换融合的红外刑侦重叠手印目标提取算法。首先, 采用阈值算法提取整体手印图和手印重叠部分图; 然后通过坐标变换方法滤除两部分图像的无关区域; 最后利用轮廓融合算法将两部分图像融合, 得到整体手印目标的提取结果。为了使提取结果具有更好的可视性, 又采用图像旋转操作后的坐标变换方法来提取单个手印目标。实验结果表明, 与其他一些目标提取方法相比, 本文方法在提取整体和单独手印目标时都具有较高的准确性和完整性。

关键词: 红外重叠手印图像; 目标提取; 阈值分割; 坐标变换; 图像融合; 图像旋转

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.10.006

Target Extraction Algorithm Based on Variable Threshold and Coordinate Transformation for Infrared Overlapped Fingerprint of Criminal Investigation

LI Jun-fang^{1,2}, LI Kai-chen^{1,2}, YU Xiao^{1,2*}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology,

Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory for Control Theory &

Applications in Complicated Systems, Tianjin 300384, China)

Abstract: Infrared overlapped fingerprint image is a kind of complex infrared image in the field of criminal in-

收稿日期: 2021-06-08

基金项目: 天津理工大学教学基金项目(YB20-05); 国家自然科学基金项目(61502340); 天津市自然科学基金项目(18JCQNJC01000); 天津市教委科研计划项目(2018KJ133); 天津市复杂系统控制理论与应用重点实验室开放基金项目(TJKL-CATCS-201907)

作者简介: 李俊芳(1974-), 女, 河北高邑人, 副教授, 博士, 主要从事自抗扰控制技术、导航与制导控制、复杂系统分析及建模、智能控制方法等方面的研究。

*通讯作者: E-mail: yx_tjtu@163.com

vestigation. The information of the image is uncertain, and the fingerprints are overlapped. How to accurately extract the overlapped target is a difficult problem in the field of criminal investigation. To solve this problem, an infrared criminal investigation overlapped fingerprint target extraction algorithm based on the fusion of variable threshold value and coordinate transformation is proposed in this paper. Firstly, the threshold algorithm is used to extract the whole and the overlapped fingerprint image. Then the coordinate transformation method is used to filter the independent regions of the two parts of the images. Finally, the contour fusion algorithm is used to fuse the two parts of the image, so as to obtain the extraction result of the whole fingerprint target. In order to make the extraction results more visual, the coordinate transformation method after the image rotation operation to extract a single fingerprint target is adopted in this paper. Experimental results show that, compared with other target extraction methods, this method has higher accuracy and integrity in the whole and single fingerprint target extraction.

Key words: infrared overlapped fingerprint image; target extraction; threshold segmentation; coordinate transformation; image fusion; image rotation

0 引言

红外成像技术是一种非接触检测技术,能够将人们肉眼难以捕获的热量信息转换成热图像,从而实现目标的可视化。该技术在各个领域具有较为广泛的应用^[1-5]。在刑侦案发现场,人们肉眼可见的仅仅是实际存在于现场的实物。而对于嫌疑人在案发现场留下的指纹、手印、脚印等信息,肉眼则无法识别。利用红外成像技术可以有效采集这些信息,有助于对现场痕迹进行快速检测和精确定位^[6]。这对案发现场的案情分析和案件进展具有促进作用。由于人的活动具有自由性,现场采集到的手印图像并不仅仅是单一的红外手印图像。比如,红外重叠手印图像就是一种比较复杂的红外图像类型。因此,在刑侦领域能否准确、完整、有效地提取红外重叠手印图像,是相关部门面临的巨大考验和技术难题。

近几年来,相关学者针对红外图像的目标提取算法取得了较多有意义的研究成果。2020年,向涛提出了一种基于显著区域提取的红外图像舰船目标检测方法^[7],即通过用图论法增强目标区域信息、用多级阈值算法提取目标区域、用模糊C均值算法进行区域分割,最终提取出了红外舰船目标。2018年,杨爽等人提出了一种基于视觉显著性和区域生长的红外目标提取方法^[8],并准确提取出了红外目标。2018年,岳江等人提出了一种将边缘和过渡

区域相结合的红外目标提取方法^[9]。他们通过边缘与过渡区域的结合,很好地抑制了噪声,并在噪声干扰下较好地提取了目标。2017年,王立力等人提出了一种基于AKAZE和色彩恢复多尺度视网膜(Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR)增强的红外图像目标提取方法^[10]。他们利用MSRCR算法增强红外图像,并采用频域低通滤波去除图像噪声,然后通过用AKAZE进行快速多尺度特征提取来生成特征点描述子,从而实现红外目标的提取。2016年,杨焘等人采用流形正则化多核模型对模糊红外图像目标进行了提取^[11]。他们利用流形正则化处理图像的优点,通过对相关类别进行分类,有效提取了红外图像目标。

但是上述算法对红外图像的处理大多是针对整体目标进行提取,并不适合在一些复杂情况下提取具有重叠性质的红外目标。一般算法主要难以对重叠手印图像所表现出来的重叠性质进行处理。除了难以处理之外,红外重叠手印图像也表现出一些独有的特点:重叠部分的灰度特征较其他手印部分存在一定的视觉差异,表现在图像特征上就是重叠部分的灰度值略大于手印其他部分的灰度值。阈值分割算法在处理灰度差值明显的图像时具有绝对的优势,能够分别将图像中灰度差值较大的各部分单独分割。因此,本文针对红外重叠手印图像的特点,利用阈值分割处理图像的优点,并结

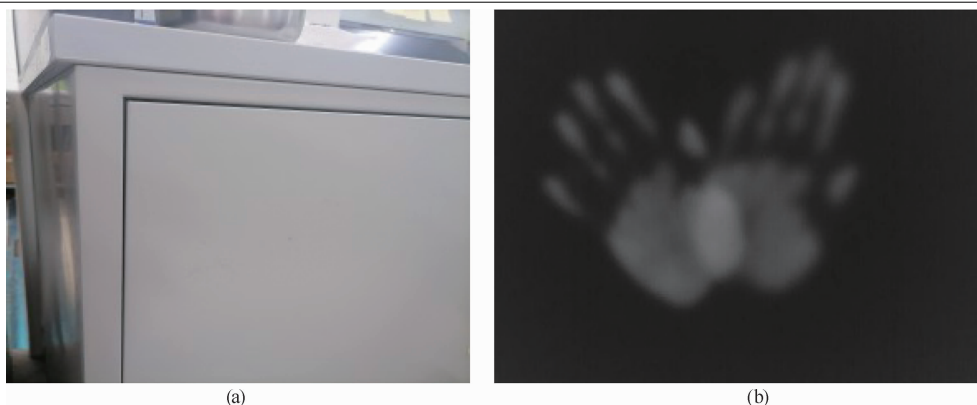


图 1 (a)可见光现场图; (b)红外摄像仪拍摄图

合坐标变换法、图像融合算法以及图像几何旋转对红外重叠手印进行处理, 从而设计出一种基于可变阈值和坐标变换融合的红外刑侦重叠手印目标提取算法。

1 问题分析

在实际案发现场, 人的肉眼难以观察到留在现场的手印痕迹, 更难以辨别出手印是否具有重叠性质。而采用红外摄像仪对案发现场进行痕迹信息采集, 就能够得到嫌疑人留在案发现场的人们肉眼难以捕获的痕迹信息。图 1(a)和图 1(b)分别为可见光相机和红外摄像仪所拍摄的现场图片。由于肉眼的局限性, 通过可见光图像无法得到任何手印痕迹信息; 而从红外摄像仪拍到的图像中可以较为清晰地看到遗留在物体表面上的重叠手印痕迹。

通过对红外摄像仪拍到的重叠手印图像进行分析, 可从整体视觉上简单地将其分为背景和整体手印目标两部分。从图像特征来看, 简单的阈值分割就能处理这类重叠手印图像。但是由于要提取的手印目标是重叠的, 仅仅采用单一的阈值分割算法无法处理重叠部分, 而只能提取简单的整体手印目标。在背景比较复杂的情况下, 甚至会提取出背景中较多的无关区域信息, 导致最终的提取结果不准确。

对于单个手印的提取, 由图 1(b)的红外图像特征分析可知, 手印间的灰度特征不具有有一致性。同一个手印的不同部位或两个手印之间的灰度分布不均匀, 因此无法通过两个手印的灰度特征差异提取单个手印。此外, 一般的

目标提取算法在提取红外重叠手印图像中的单个手印目标时都没有适应性, 效果均不理想, 甚至无法提取单个手印目标。

2 基于可变阈值和坐标变换融合的红外刑侦重叠手印目标提取算法

下面针对红外重叠手印图像的目标提取, 根据图像自身特点和相关图像特征, 提出一种基于可变阈值和坐标变换融合的红外刑侦重叠手印目标提取算法。该算法集阈值分割算法、坐标变换法、图像融合算法以及图像几何旋转于一体, 着重解决了重叠手印目标提取困难的问题。图 2 为本文算法的整体流程图。

2.1 阈值算法前处理

阈值分割^[12-13]是一种区域分割技术, 适用于物体与背景有较强对比的情况。该技术利用图像中需提取的目标物体与背景在灰度上的差异, 选择一个合适的阈值 T 。将图像中的所有像素点分成灰度值小于等于 T 和大于 T 的两部分。根据图像的性质, 两者分别对应图像的背景和目标区域, 最终得到二值图像。假设将其应用于图像 $f(x, y)$, 则 $f(x, y) > T$ 的所有像素点归为目标点, 其余的点归为背景点。分割后得到的二值图像 $g(x, y)$ 可表示为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T \\ 0, & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

通常最直接的方法是通过灰度直方图的分布来确定最佳阈值 T 。当背景与目标之间的灰度差异较大时, 灰度直方图上会有明显的两个波峰和一个低谷。常将这个低谷作为 T 的基

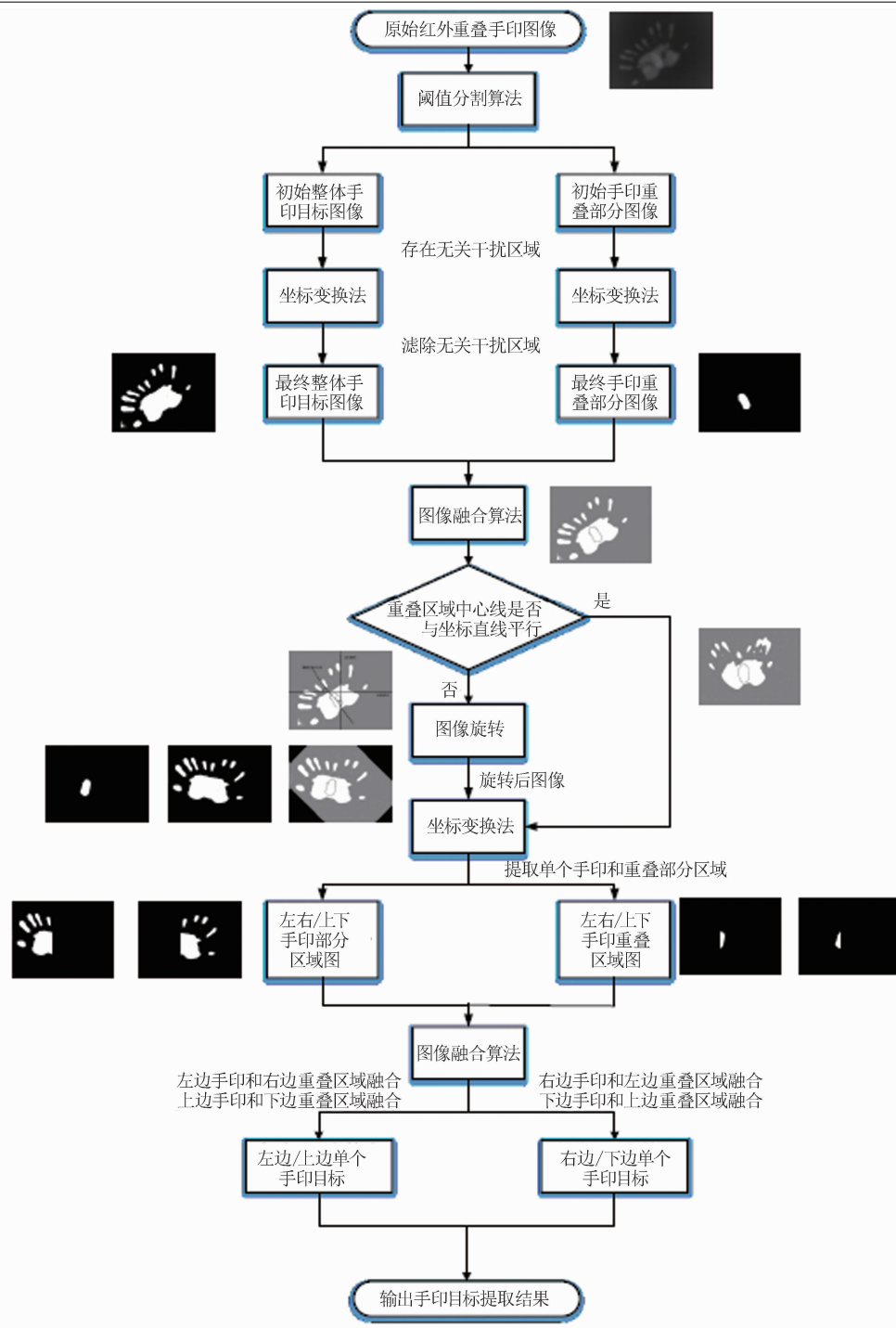


图2 本文算法的整体流程图

准值。根据阈值分割处理图像的性质，分析红外重叠手印图像的特点(以图1为例)可知，手印目标与背景之间存在明显的视觉差异，即两者在灰度上差异明显。图3为具体的灰度直方图。可以看出，其中有明显的一个大波峰和两个小波峰。大波峰与两个小波峰之间的谷底就

可看作图像背景与手印目标的分界线。大于该波谷值的就是手印目标，反之则是背景区域。因此，利用该点的阈值 T 能够从背景中提取整体手印目标(具体的提取结果见图4)。

图3中的大波峰附近区域表示背景；其中一个波峰的附近区域表示手印目标，而另一

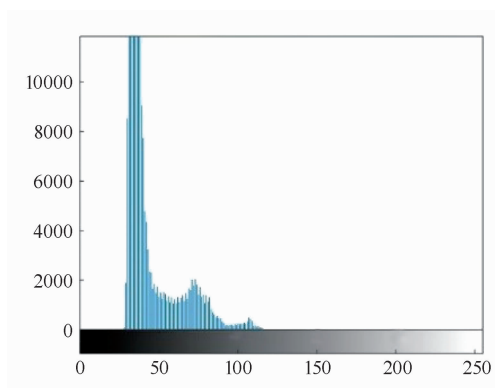


图 3 灰度直方图



图 4 基于阈值 T 的提取结果

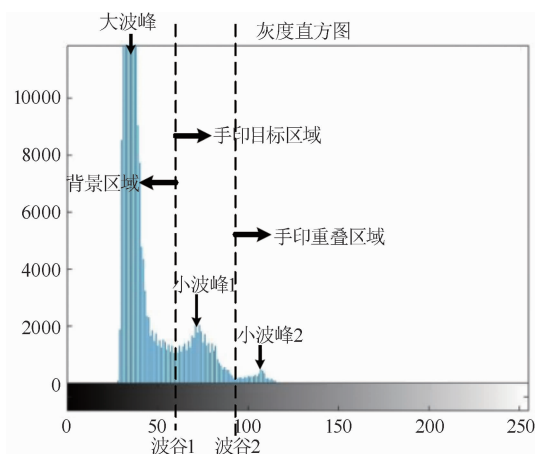


图 5 直方图信息显示图

一个小波峰的附近区域代表手印间的重叠区域 (见图 5)。反映到红外重叠手印图像中, 即从灰度差异上继续细分: 背景属于一部分, 整体手印属于另一部分, 手印的重叠区域也同样可以单独作为一部分。基于人眼的视觉效果, 整体手印与手印的重叠部分之间的灰度差异存在较为明显的视觉差。图 6 所示为背景、手印、重叠手印三部分的局部灰度值差异。

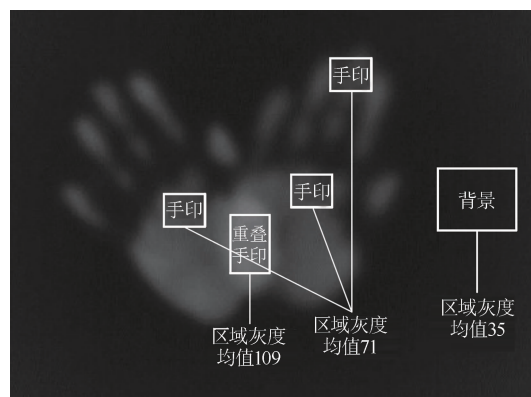


图 6 背景、手印、重叠手印的局部灰度值差异图

结合阈值算法处理图像的特点, 提取手印重叠部分时可基于其与手印之间的灰度差异再次采用可变阈值分割算法。根据直方图特征可得到两个波谷的灰度阈值 T_1 和 T_2 。初始的红外重叠手印图像 $f(x,y)$ 可根据 T_1 和 T_2 的取值划分为三部分: $f(x,y) \leq T_1$ 为背景区域; $T_1 < f(x,y) \leq T_2$ 为手印区域; $f(x,y) > T_2$ 为手印重叠区域。分割后的图像 $g(x,y)$ 可表示为

$$g(x,y) = \begin{cases} t_1, & f(x,y) \leq T_1 \\ t_2, & T_1 < f(x,y) \leq T_2 \\ t_3, & f(x,y) > T_2 \end{cases} \quad (2)$$

单独对重叠部分进行提取, 得到图 7(a) 所示的结果。然后对重叠部分的轮廓进行提取, 最终得到手印重叠部分的轮廓图 (见图 7(b))。

2.2 坐标变换法

通过用阈值算法 (合理选取阈值) 处理背景简单的红外重叠手印, 可以得到比较理想的结果。但是不排除背景较为复杂的情况: 当背景灰度值大部分接近手印目标灰度值时, 阈值算法处理也难以完全有效地提取出较为准确的整体手印图。受背景的影响, 会同时得到较多无关的干扰区域。采用阈值法来处理图 8(a) 所示的红外重叠手印图。在保证手印信息比较完整的前提下选取了两个阈值, 分别得到了图 8(b) 和图 8(c) 所示的结果。

由初步的阈值法处理结果可知, 除手印信息之外, 两个阈值处理后的图像边缘存在大片的干扰区域, 严重影响了后续手印目标的单独

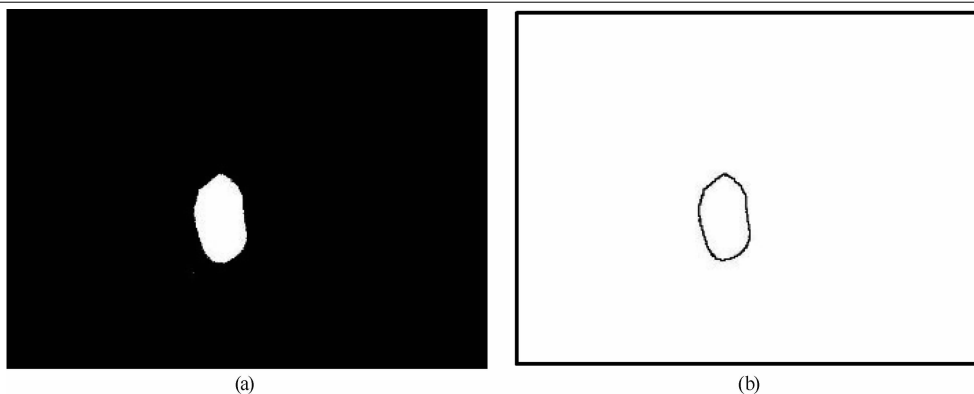


图 7 (a)重叠部分的二值图；(b)重叠部分的轮廓图

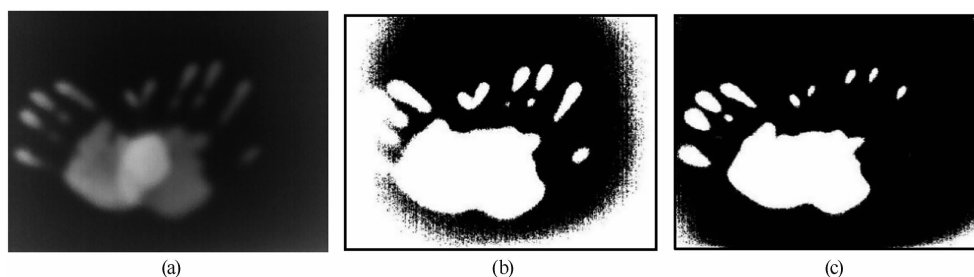


图 8 (a)红外重叠手印图；(b)阈值 1 的处理结果；(c)阈值 2 的处理结果

提取。由于一些传统的噪声去除算法无法处理背景中的大片干扰区域，而且用可变阈值算法处理后的二值图像特征和背景中可能存在干扰区域，因此采用一种基于坐标变换的背景干扰区域去除方法。

这种方法通过确定二值手印图中手印的左右上下的边界坐标点来形成整体手印目标的坐标轮廓。假设手印目标的左右上下四个边界坐标点分别为 $g(x_1, y_1)$ 、 $g(x_2, y_2)$ 、 $g(x_3, y_3)$ 和 $g(x_4, y_4)$ ，则整体手印目标的坐标轮廓就是一个长为 $y_2 - y_1$ 、宽为 $x_4 - x_3$ 的矩形区域 $Q(x, y)$ 。经过坐标变换处理后，得到图像 $h(x, y)$ ：

$$h(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & f(x, y) \in Q(x, y) \\ 0, & \begin{cases} y_{f(x, y)} < y_1 \\ y_{f(x, y)} > y_2 \\ x_{f(x, y)} < x_3 \\ x_{f(x, y)} > x_4 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

通过坐标变换确定的矩形区域可保证不丢失二值图中的手印信息，不会因为其他操作导致手印中的相关区域被滤除。此外，矩形区域内因滤除了背景中的干扰区域而仅有手印目

标。由此也就将整个二值图像再次分为两部分：一是矩形区域；二是除矩形区域外的其他区域。最终，坐标变换将矩形区域外的其他区域滤除，并将其与背景同化，即区域内的灰度值都归零。图 9 为坐标变换处理的示意图。

对图 8(b)和图 8(c)所示的二值图像进行了坐标变换处理，得到了图 10 所示的结果。

2.3 图像融合算法

通过前面的处理，分别得到了手印重叠区域的二值图像以及经过坐标变换滤除后的整体手印二值图。两个处理结果仅仅是红外重叠手印图像目标提取过程的一部分，难以作为最终的目标提取结果。其中，整体手印二值图像作为手印部分的提取结果，而重叠区域二值图像则作为重叠问题的初步解决方案结果。但是两者都较为片面，缺少对方各自拥有的部分。

通过用一种图像融合算法^[14-15]对两个片面的结果进行融合，可以解决两者彼此缺少的问题，从而形成图像新的特点——你中有我、我中有你。经过图像融合算法处理后，红外重叠手印的目标提取得以初步实现。图 11 所示为对图 1 进行处理后得到的初步目标提取结果。

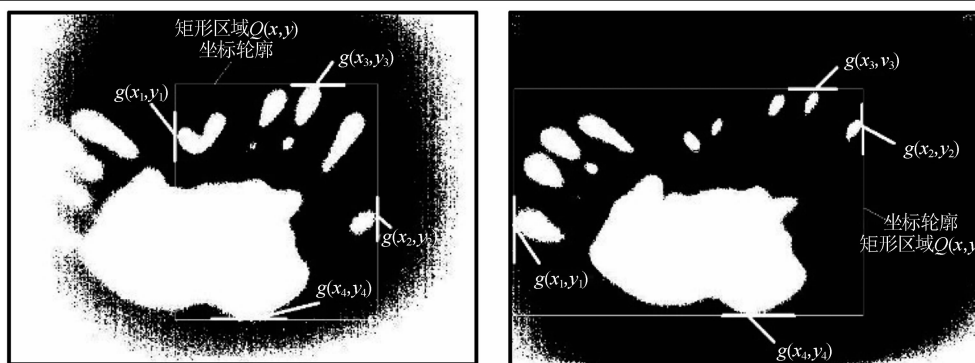


图 9 坐标变换处理的示意图

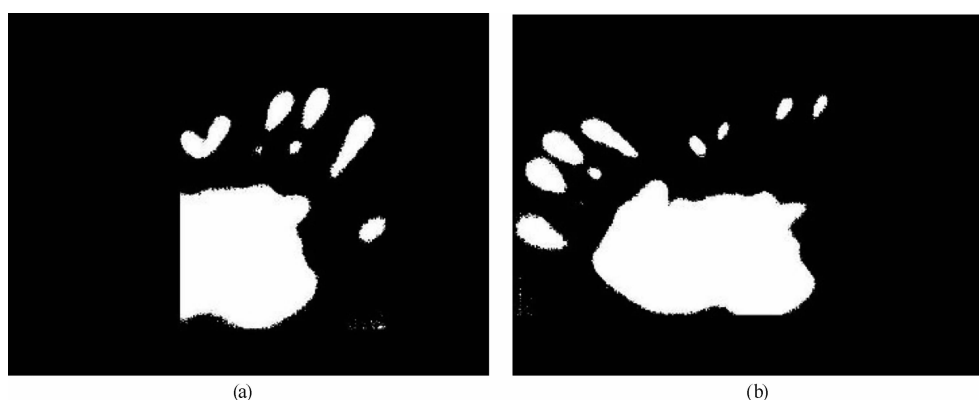


图 10 坐标变换处理结果: (a)图 8(b)的处理结果; (b)图 8(c)的处理结果



图 11 目标提取结果

2.4 单手印目标提取

通过前面对红外重叠手印图像的处理,初步实现了手印目标的提取。图 11 较好地展示了处理后的结果。从视觉效果上来看,重叠手印的轮廓信息在融合重叠轮廓后比较清晰,能够初步分辨出两个手印各自的基本轮廓。但是缺点在于重叠轮廓提取不完整,难以完全与手印图像进行匹配,导致最终的融合结果中轮廓边缘融合不到位且手印的部分轮廓信息缺失。

基于对上述问题的处理,进一步提出了图像旋转坐标变换的单个手印提取算法。结合

2.2 节中提出的坐标变换方法,处理图像时在水平和垂直坐标直线的基础上展开。因此,再次进行坐标变换前先将重叠手印图像旋转到最符合坐标变换的角度^[16-17]。对于单个手印的目标提取,采用坐标变换法的核心在于两个手印重叠轮廓的中心线能够与坐标变换的坐标直线相吻合,然后基于该坐标直线,以重叠区域的中心线为划分基准将手印分为两部分,从而得到单个手印的初始目标区域。但是在实际采集红外重叠手印图像时,人的主观活动性使得采集到的图像并不完全符合坐标直线划分标准,重叠区域中心线的角度存在一定的偏差(见图 12)。

由图 12 可知,重叠区域中心线与水平和垂直坐标直线都存在一定的角度差,故无法通过它得到初始的单个手印目标区域。因此,采用图像旋转的方法(将重叠手印图像整体旋转一定的角度)对重叠区域中心线的角度进行校正,从而达到最佳的坐标变换处理位置。图 13 为图像旋转的具体流程图。

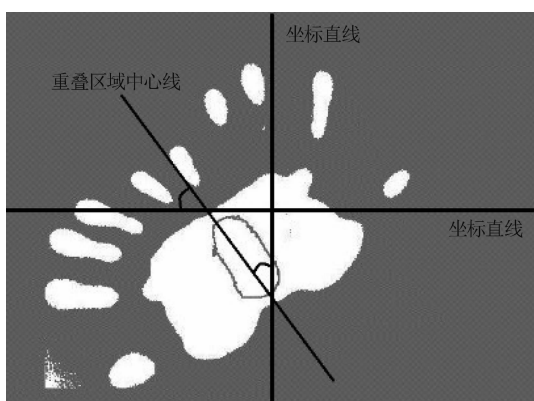


图 12 重叠区域中心线的角度偏差

由图 13 可知, 图像旋转的中心点即为图像的坐标中心点。通过水平和垂直坐标线可以确定坐标中心。因此, 图 13(a) 中虚线表示的目标区域中心线与水平和垂直坐标线存在角度

差。通过图 13(b) 中的旋转角度可以对虚线进行一定的角度修正, 使其能够平行于水平和垂直坐标线, 如图 13(d) 中的虚线位置所示。但是旋转后的图像若不经进一步处理则会出现图 13(c) 中图像大小改变的问题。由于是对图像整体进行旋转的, 旋转后图像的大小会由四个边角的位置决定, 最终在原图像的基础上扩大了图像的尺寸。因此, 在保留图像基本信息的基础上, 将图像裁剪至原图像的大小(见图 14(d)), 以保证后续处理的可行性要求。图 14(a) 所示为对图 12 进行旋转操作后得到的结果。

图 14(b) 和图 14(c) 所示分别为对整体手印图的二值图像与手印重叠区域二值图像进行

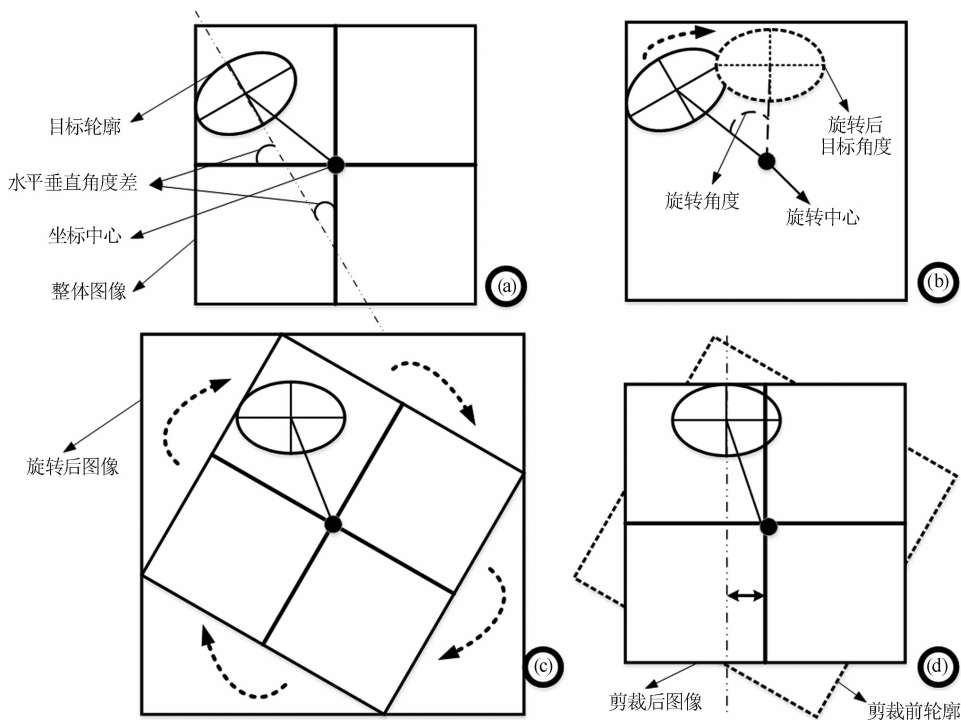


图 13 图像旋转流程

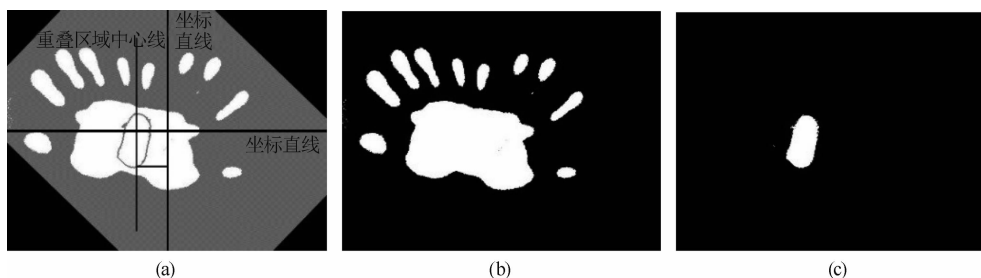


图 14 旋转后的图像: (a) 目标提取结果旋转图; (b) 手印二值旋转图; (c) 重叠二值旋转图

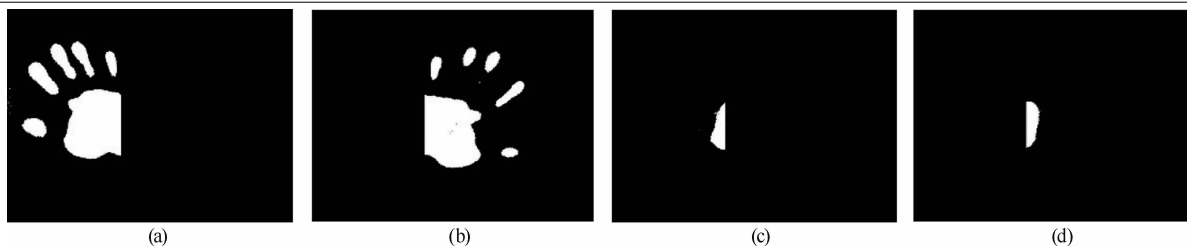


图 15 (a)左边手印目标; (b)右边手印目标; (c)左边重叠轮廓; (d)右边重叠轮廓

相同旋转操作后的结果。最后, 再次以两者为基础, 使用坐标变换和融合算法来提取单个手印。根据图 14(a)中确定的重叠区域中心线位置, 对图 14(b)和图 14(c)进行坐标变换处理, 分别得到左右手印部分区域图和左右重叠轮廓区域图(见图 15)。最终采用融合算法将左边手印和右边重叠轮廓融合, 并将右边手印和左边重叠轮廓融合, 从而提取出单独的左边手印目标和右边手印目标。

3 实验结果与分析

本实验是在配置为 Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU、8GB RAM 的计算机上完成的。在 Windows 操作系统中, 采用 MATLAB R-2016b 软件进行实验。选取六幅不同类型的现场红外刑侦重叠手印图像进行本文算法的实验处理, 并将在 3.1 节中展示具体的实验处理结果。此外, 在 3.2 节中将本文方法的实验结果分别与传统阈值分割算法、边缘检测算法、分水岭算法、轮廓提取算法以及主动轮廓模型算法的处理结果进行比较。

3.1 实验结果

实验结果如图 16 所示。其中, 图 16(a)为红外重叠手印原始图像, 图 16(b)、图 16(c)、图 16(d)所示分别为经本文算法处理后的整体手印以及偏左边、偏右边的单个手印目标的提取结果。从图 16(b)中可以看出, 在视觉效果上能够识别出手印目标的大体轮廓, 而且手印重叠部分缺失的轮廓信息基本补足了。从图 16(c)和图 16(d)中可以看出, 本文算法能够很好地提取出单个手印目标, 消除了重叠问题的影响, 从而有效、准确地提取出手印目标。

3.2 实验分析

为了验证本文算法的优越性和准确性, 将其与其他五种算法对红外重叠手印图像的处理结果进行了对比实验。图 17 所示为采用传统阈值分割算法、边缘检测算法、分水岭算法、轮廓提取算法以及主动轮廓模型算法的处理结果。

由图 16 可知, 本文算法很好地提取出了单个手印目标, 消除了重叠问题的影响, 从而有效、准确地提取出了手印目标。结合图 17 可知, 传统的阈值分割算法虽然能提取出手印信息, 但是只能整体提取而无法处理重叠等细节问题; 边缘检测 sobel 算子虽然能提取出部分重叠轮廓, 但是在处理边缘轮廓的完整性和连续性时效果不佳; 改进分水岭算法只能提取出手掌的部分信息, 而手指信息基本被滤除, 结果存在较大误差; 轮廓提取算法的局限性同样是只能提取手印整体的轮廓信息而无法处理重叠部分; 主动轮廓模型算法在原始红外图像的基础上, 通过标定轮廓模型点来确定目标信息的整体轮廓, 但是其最终得到的手印轮廓模型结果严重脱离原始手印目标信息, 使得提取结果严重偏离理想结果。

相比之下, 本文算法的处理结果在提取手印目标和解决重叠问题两方面都有较高的准确性。此外, 本文算法得到的单个手印结果与原始红外图像中手印的主观视觉效果非常接近。综上所述, 本文算法具有明显优势。

4 结论

红外重叠手印图像是刑侦领域中一类特殊的红外图像。手印目标的重叠性质极大地增加了目标提取难度。针对该问题, 本文利用阈值

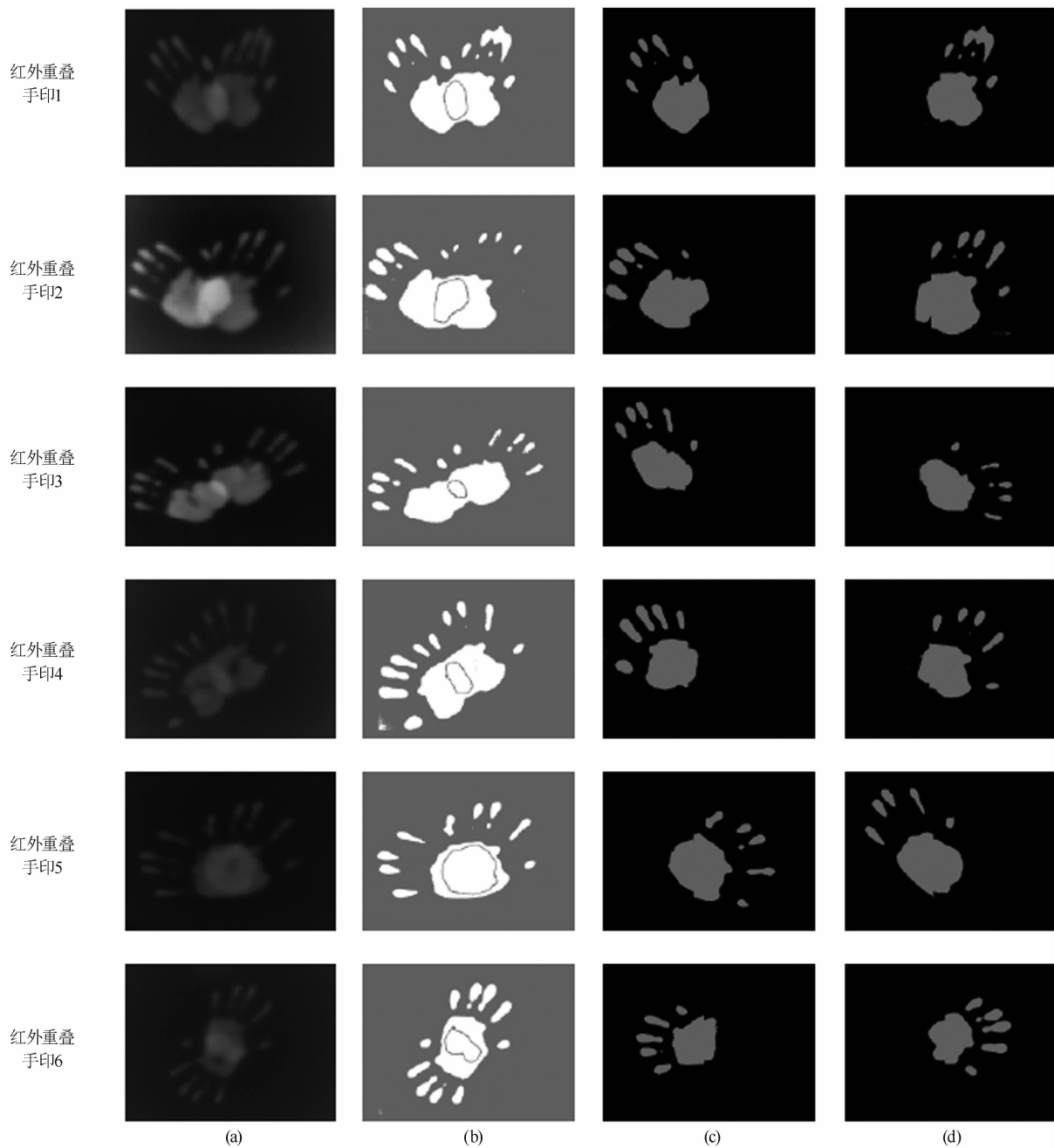


图 16 本文算法的实验结果：(a)原始红外重叠手印图像；(b)整体手印目标提取结果；(c)左边单个手印提取结果；(d)右边单个手印提取结果

分割算法处理图像的简单高效性，并结合坐标变换方法和图像融合算法处理重叠手印图像的有效性，设计了一种基于可变阈值和坐标变换融合的红外刑侦重叠手印目标提取算法。通过算法实验结果及对比试验验证了这种算法在提取红外重叠图像目标时的准确性和优越性。本文的研究重点是手掌间的重叠性，而尚未涉及手指之间或手指与手掌间的重叠。因此，下一

步的研究重点是红外指间重叠手印图像和红外指掌重叠手印图像的目标提取。另外还要验证本文算法在处理这两类图像时是否同样具有适应性和有效性。

参考文献

- [1] 王利锋, 辛丽平, 于波, 等. 基于热红外图像的海面油膜面积的测算方法 [J]. 海洋通报,

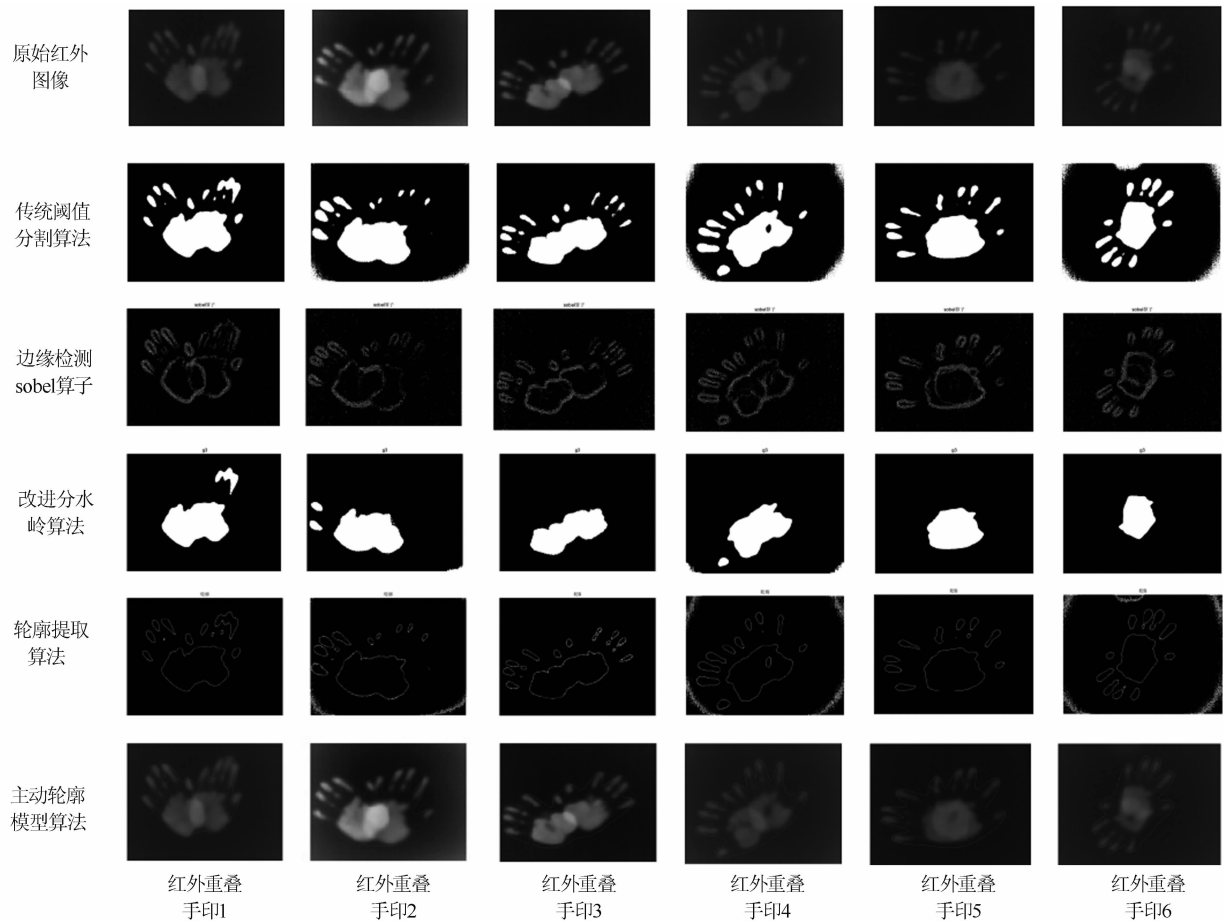


图 17 采用五种算法进行对比实验的处理结果

2020, **39**(6): 750-760.

- [2] 程子夜. 电气设备故障的红外图像处理技术 [J]. *电子世界*, 2020, **27**(17): 132-133.
- [3] 刘梦. 基于热红外图像处理技术的农作物冠层病害诊断方法研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [4] Cao J J, Wang P, Qi Y M, et al. Application research of infrared image processing technology in the quality inspection of riveting parts [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, **2019**(23): 9226-9229.
- [5] 刘海峰, 张超, 罗江, 等. 基于凸壳检测的红外船舶轮廓提取技术 [J]. *指挥与控制学报*, 2017, **3**(3): 255-259.
- [6] 郭瑞乐, 葛青. 信息化条件下痕迹检验技术的应用研究 [J]. *法制博览*, 2018, **7**(33): 146.
- [7] 向涛. 基于显著区域提取的红外图像舰船目标检测 [J]. *电讯技术*, 2020, **60**(7): 785-790.
- [8] 杨爽, 徐宏宇, 唐泽坤. 基于视觉显著性和区域

生长的红外目标提取方法 [J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2018, **35**(4): 85-89.

- [9] 岳江, 王昭昕, 韩静, 等. 一种边缘和过渡区域相结合的红外目标提取方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, **38**(6): 1729-1735.
- [10] 王立力, 夏飞. 基于 AKAZE 和 MSRCR 增强的红外图像目标提取 [J]. *现代计算机(专业版)*, 2017, **24**(35): 75-80.
- [11] 杨焱, 付冬梅. 流形正则化多核模型的模糊红外目标提取 [J]. *工程科学学报*, 2016, **38**(6): 876-885.
- [12] Sun Y H, Mu Y, Feng Q, et al. Deer Body Adaptive Threshold Segmentation Algorithm Based on Color Space [J]. *Computers, Materials and Continua*, 2020, **64**(2): 1317-1328.
- [13] 宋佳声, 王永坚, 戴乐阳. 基于不同自适应阈值法的铁谱图像分割效果比较 [J]. *润滑与密封*, 2021, **46**(4): 111-115.
- [14] Kurban T. Fusion of remotely sensed infrared and visible images using Shearlet transform and back-

tracking search algorithm [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, **42**(13): 5087–5104.

- [15] Chi Z F. Research on satellite remote sensing image fusion algorithm based on compression perception theory [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2021, **21**(2):

341–356.

- [16] 尹雪, 刘思念, 袁春梅, 等. 基于 DSP 的双线性插值算法在图像旋转中的应用 [J]. *舰船电子工程*, 2020, **40**(3): 97–100.
- [17] 李承轩, 舒忠. 基于双线性插值的印刷图像旋转算法实现 [J]. *现代计算机(专业版)*, 2019, **26**(11): 85–89.

(上接第 27 页)

- [3] 白心爱. 空间目标轨道高度及大小对其表面温度的影响 [J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 2011, **26**(1): 75–80.
- [4] 申文涛, 朱定强, 蔡国飙. 中段弹道目标的温度场与红外辐射特性计算 [J]. *宇航学报*, 2010, **31**(9): 2210–2217.
- [5] 戴聪明, 陈秀红, 魏合理. 高层大气环境对长波红外背景辐射特性的影响分析 [J]. *红外*, 2012, **33**(9): 23–29.
- [6] 张永棠, 洗敏仪. 中红外 $2\ \mu\text{m}$ Tm:YLF 激光热效应分析 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(7): 813–816.
- [7] 祝念, 高思莉, 岳娟. 高速飞行目标尾焰红外辐射特性的建模仿真计算 [J]. *红外*, 2018, **39**

(5): 8–12.

- [8] 戴桦宇, 张雅声, 周海俊, 等. 大气层外弹道目标红外辐射特性研究 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(8): 993–998.
- [9] 姚晓蕾. 突防措施下中段弹头的红外辐射特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [10] 杨贤荣, 马庆芳, 原庚新, 等. *辐射换热角系数手册* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [11] 梁蕾. 洲际弹道导弹突防技术发展趋势 [J]. *飞航导弹*, 2018, **48**(8): 55–57.
- [12] 赵国柱, 金健. 俄罗斯战略导弹突防技术发展研究 [J]. *飞航导弹*, 2020, **50**(7): 62–66.
- [13] 李刚, 王蜀杰, 李兴格. 地空导弹突防技术综述 [J]. *飞航导弹*. 2019, **49**(8): 35–38.