

文章编号: 1672-8785(2013)03-0001-06

基于红外偏振成像的目标检测技术

白玉栋

(中国人民解放军91404部队, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 红外偏振成像技术是利用物体偏振度上的差异来对复杂背景下的目标进行探测的。在战场上, 由于人造物体和自然景物在偏振度上存在差异, 红外偏振成像技术能够提高人们对自然景物及伪装的辨别能力。首先介绍了偏振成像理论及其系统的结构组成, 然后对基于偏振图像处理的目标特征提取过程进行了分析, 并对偏振图像像质评价方法以及图像融合、分割和特征提取方法进行了研究。最后给出了国外基于偏振成像目标检测技术的应用研究情况, 并指出了该技术在军事领域中的应用价值。

关键词: 偏振成像; 目标检测; 偏振图像处理; 特征提取

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.03.001

Target Detection Technology Based on Infrared Polarization Imaging

BAI Yu-dong

(Unit 91404 of the Chinese People's Liberation Army, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Infrared polarization imaging can use the difference of objects in the degree of polarization to detect the targets against the complex background. In the battlefield, because the man-made and natural objects have a difference in the degree of polarization, the use of infrared polarization imaging can improve one's ability to distinguish the camouflage from the nature. Firstly, the theory of polarization imaging and its system components are presented. Then, the target feature extraction based on the polarization image processing is analyzed. The polarization image quality evaluation, image fusion, image segmentation and feature extraction methods are studied. Finally, the applications based on infrared polarization imaging at abroad are given and the value of this technology to military applications is pointed out.

Key words: polarization imaging; target detection; polarization image processing; feature extraction

0 引言

传统的红外成像技术测量的是场景的辐射强度信息。当目标处在与其辐射强度相当的背景中时, 会由于受到复杂背景信号的干扰而被淹没。作为自动目标识别的第一步, 目标检测对目标结构识别起着决定性作用。传统的目标检测方法都是建立在大量关于目标和杂乱背景的先验信息的基础之上, 这就使得检测结果对目

标和背景很敏感。当待检测目标及周围环境与先验信息相差较大时, 检测效果急剧下降, 甚至无法检测到目标^[1]。红外偏振成像技术测量的是目标和背景辐射在某个偏振方向上的强度对比情况, 而不同物体或者同一物体的不同状态(例如物体的含水量、构成材料的理化特征、表面粗糙度和物体的折射率^[2]等)可能会有不同的偏振状态, 且与波长有密切关系, 形成偏振光谱。因此, 可以借助红外偏振成像技术以及后期

收稿日期: 2013-01-31

作者简介: 白玉栋(1984-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 主要研究方向为光电对抗。E-mail: baiyudong2003@126.com

的图像处理法来显示隐藏的目标,从而实现对外伪装目标的探测和识别。

1 偏振成像理论及系统

1.1 偏振成像理论

1.1.1 偏振信息的描述

用于描述偏振信息的方法主要有 Jones 矢量法和 Stokes 矢量法两种。下面对 Stokes 矢量法作简要介绍。

Stokes 矢量包括 4 个参量,分别为 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 , 其定义如下:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{rc} - I_{lc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, I_0 和 I_{90} 分别为 0° 和 90° 偏振方向上的光强; I_{45} 和 I_{135} 分别为 45° 和 135° 偏振方向上的光强; I_{rc} 和 I_{lc} 分别为右旋和左旋圆偏振光的光强。

$$S_{out} = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = M \cdot S_{in} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

称为穆勒矩阵,其表示物质对于不同偏振方向的透射特性,由物质特性决定。它全面记录了光学系统对入射光偏振度的影响情况。因此,穆勒矩阵可以将通过偏振片前后的 Stokes 参数联系起来。

1.2 偏振成像系统及图像获取

场景辐射经过偏振片后,在与 X 轴成 α 夹角的方向上观测到的光强为

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \quad (7)$$

因此,偏振度 (Degree of Polarization, DOP) 的定义为

$$DOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (2)$$

在实际应用中,圆偏振分量很小,相对于仪器误差来说可以忽略不计。故通常假定 $V=0$, 此时可以得到线偏振度 (Degree of Linear Polarization, DOLP):

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (3)$$

偏振角的定义为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan^{-1}\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (4)$$

1.1.2 偏振信息的传输

穆勒矩阵用于描述光波偏振态的传输特性。对于线性光学系统来说,出射光束的 4 个 Stokes 参量与入射光束的 4 个 Stokes 参量之间成线性关系,即

因此,通过测量 0° 、 45° 、 90° 和 135° 偏振方向上的图像,即可计算出 I、Q、U 图像以及线偏振度 DOLP、偏振角图像。

红外偏振成像技术是用线偏振片对场景辐射和反射辐射进行检偏滤波,然后用热像仪接收线偏振辐射来完成成像的。在实际测量中,可以用步进电机以步进的方式将偏振片旋转到上述 4 个偏振方向,用以消除手动误差以及人体红外辐射对成像的影响,其结构原理见图 1,实物图见图 2 左图^[3]。同时,为了消除步进电机引入的机械噪声,可以用分束镜对入射辐射进行分束,并采用多个偏振片和多个探测器进行凝视成像^[4]。但这种偏振成像技术方案采用了较多的分束镜、偏振片、聚焦透镜和探测器阵列,使

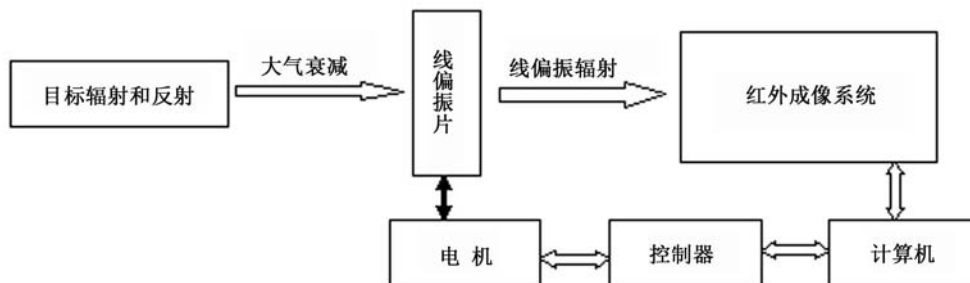


图 1 用步进电机旋转偏振片来进行直接偏振成像的示意图

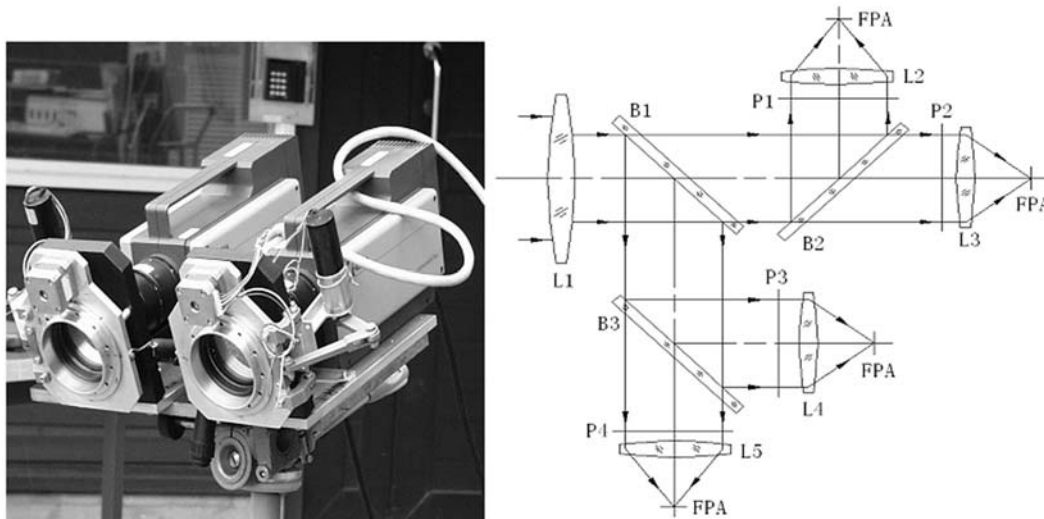


图 2 直接偏振成像的实物图 (左) ; 多探测器凝视成像的光路图 (右)

得整机系统的成本相对较高。随着近年来 MEMS 技术的不断发展, 已经有研究人员开始把偏振片列阵直接安放在焦平面阵列附近, 如图 3 所示。4 个微偏振片组成 1 个偏振片单元, 1 个偏振片单元对应于 4 个探测器像元。其中, 每一个像元对应于不同的微偏振片, 此时再作适当的电子学处理就可形成偏振探测器。这种结构可以省去复杂的外部装置, 是红外偏振成像技术发展的高级阶段, 也是偏振成像技术未来的发展方向。

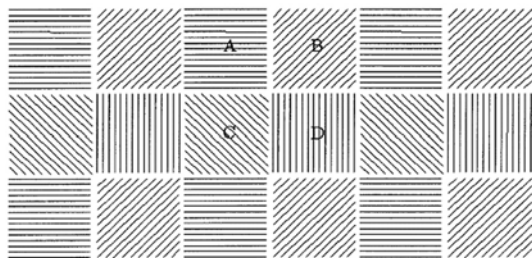


图 3 线偏振片与焦平面阵列的耦合

对场景进行偏振成像, 获取有用的目标信息, 其技术环节包括以下 3 个方面: (1) 进行景物偏振静态分解, 扫描角度编码, 从探测器的光强响应中解算出景物光波的偏振信息; (2) 在获取景物光波偏振原始图像的基础上, 进行图像处理、增强和融合, 实现偏振图像的可视化显示; (3) 提取目标特征。

2 偏振成像图像处理方法

2.1 红外偏振图像的评价

偏振图像处理效果评价方法目前可以分为主观评价法和客观评价法两类^[5]。在许多图像处理应用中, 最终的用户是人, 因此人眼的视觉特性也是非常重要的考虑因素之一。同时, 由于图像处理往往是作为特定任务的预处理部分, 图像处理效果评价取决于其能否提高后续任务的能力。下面主要介绍几种图像处理质量客观评价方法。

图像的灰度平均值可以反映图像的平均亮度。若灰度均值适中,则图像的目视效果较好。图像的灰度标准差表示灰度分布的离散程度,它反映了图像的对比度状况。

如果用 $G(x, y) = g$ 表示图像中第 (x, y) 个像素的灰度值 g , L 表示图像的灰度级数 ($0 \sim 2^N - 1$, 其中 N 为图像存储的二进制位数), $m \times n$ 表示图像大小,那么图像的灰度均值为

$$\bar{\mu} = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n G(x, y) \quad (8)$$

图像的灰度标准差为

$$\sigma_g = \left[\sum_{g=0}^{L-1} (g - \bar{\mu})^2 \times p(g) \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中, $p(g)$ 为图像灰度级为 g 的像素与图像总像素数之比。

图像的平均梯度用于表征图像的清晰度,它反映了图像质量的改进情况以及图像中的微小细节反差和纹理变化特征。平均梯度越大,图像的清晰度越高,微小细节及纹理特征反应也就越好。

如果用 $\Delta_x G$ 和 $\Delta_y G$ 分别表示图像在 X 和 Y 方向上的梯度,那么图像的平均梯度可以定义为

$$AG = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [\Delta_x G^2(x, y) + \Delta_y G^2(x, y)]^{1/2} \quad (10)$$

2.2 偏振图像融合

红外偏振图像在获取过程中会受到各种噪声的影响,造成图像质量退化或者图像几何失真,因此有必要对图像进行滤波和图像校正预处理。

中值滤波、均值滤波以及常规的频域低通滤波都能在一定程度上消除噪声和抑制杂乱信号的干扰,但是它们同时也会造成图像平滑和损失图像的边缘细节信息。

图像融合是指用一定的方法将两幅或者多幅图像组合成一幅新图像的过程。融合后得到的图像可以提供比原始图像更好的性能,比如增强图像的可信度,减小图像的歧义,增强图像的可分类能力以及减小图像的噪声含量等^[6]。除了通过用各个偏振角度的图像进行融合来计算 I 、 Q 、 U 以及 $DOLP$ 、线偏振角图像以外,偏振图像融合方法还可以在上述 5 种图像之间进行融合^[7],以期得到更好的视觉效果。常用的图像融合方法包括基于 HIS 变换的融合方法、基于 Laplacian 变换的融合算法以及基于小波变换的图像融合方法等。

图 4 所示为基于小波变化的图像融合过程。分别对 Stokes 矢量的前三个参数 I 、 Q 、 U 图像进行离散小波变换,并将其与对应的小波系数相乘,然后采用一定的融合规则进行合成,再经过小波逆变换便可得到最终的融合图像。

由于不同的 Stokes 矢量参数图像所包含的能量信息不同,利用各幅 Stokes 图像的能量和所含信息量(有用的目标信息、杂乱背景信息和噪

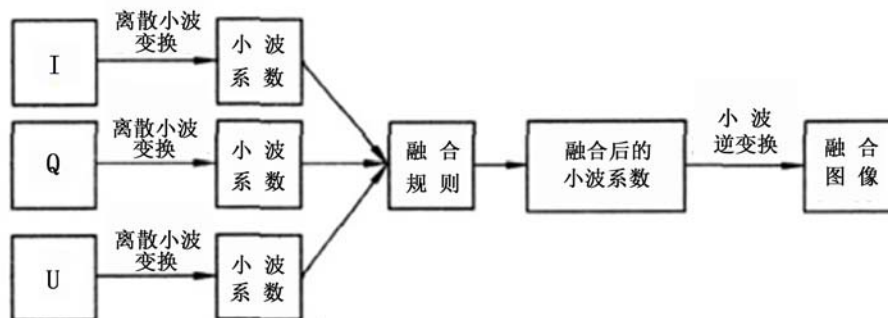


图 4 基于小波变换的图像融合过程

声信息)的不同来确定融合规则。

2.3 图像分割

在完成图像融合之后,接下来的任务就是对图像进行分割,将我们关心的目标图像与复杂背景图像区分开来。当前图像分割方法主要包括阈值分割、边缘检测分割、多尺度分割、统计学分割以及区域边界相结合的分割方法^[7]。下面主要介绍阈值分割方法。

在进行图像阈值分割时,阈值的选取决定着图像的分割质量。基于图像的局部特征来确定阈值是阈值选取的一种方式。在这种方式中,图像的局部特征可以用像素邻域性质来描述,一般借助梯度算子作用于像素邻域来实现。

如果用 $f(x, y)$ 表示像素 (x, y) 的灰度值, $g(x, y)$ 表示 $f(x, y)$ 的梯度,那么图像的有效平均梯度可以定义为^[9]

$$EAG = \frac{\sum_{i,j \in Z} g(i, j)}{\sum_{i,j \in Z} p(i, j)} = \frac{TG}{TP} \quad (11)$$

式中, TG 为梯度图的总梯度值; TP 为非零梯度像素的总数。

为了减少各种干扰对阈值的影响,用高帽剪切和低帽剪切对图像进行剪切。若 L 为剪切值,则高帽剪切为

$$f_{high}(i, j) = \begin{cases} L, & f(i, j) \geq L \\ f(i, j), & f(i, j) < L \end{cases} \quad (12)$$

低帽剪切为

$$f_{low}(i, j) = \begin{cases} L, & f(i, j) < L \\ f(i, j), & f(i, j) \geq L \end{cases} \quad (13)$$

如果对剪切后的图像进行梯度变换,那么梯度和 L 有关,因而 EGA 就和 L 有关,记为 $EAG_{high}(L)$ 和 $EAG_{low}(L)$ 。一般而言, $EAG_{high}(L)$ 和 $EAG_{low}(L)$ 都只有一个峰值。这两个极限就决定了过渡区的灰度范围。过渡区是一个环绕目标边界的带状区域。可以对这个区域进行骨架化处理,从而得到较窄的边界。

2.4 红外偏振图像的特征提取及目标识别

在对图像进行合理分割以后,可以对图像进行目标识别和分类。对分割后的图像计算每个目标的特征量,然后进行目标特征提取。特征计算的可靠性是目标分类的基础。目前用于目标识别的特征主要有以下几种^[8]: (1) 纹理特征(图像的边界、轮廓、形状、纹理和区域等); (2) 图像灰度的统计特征(直方图和矩特征等); (3) 变换系数特征或滤波器系数特征(傅里叶变换和小波变换系数等)。较好的特征提取有助于对目标进行正确分类,使相同的目标具有最大的相似性和不同的目标具有最大的相异性。

3 红外偏振成像技术在目标检测中的应用

通过利用人造物体和自然物体在偏振度上的差异,红外偏振成像技术可以有效地探测复杂背景下或者伪装的人造物体。国外利用偏振成像技术对人造物体探测开展了较多研究。图5所示为2002年英国国防科技实验室利用红外偏振成像技术进行扫雷实验研究时的情况^[9]。可以看出,红外偏振成像技术在遮蔽目标检测效

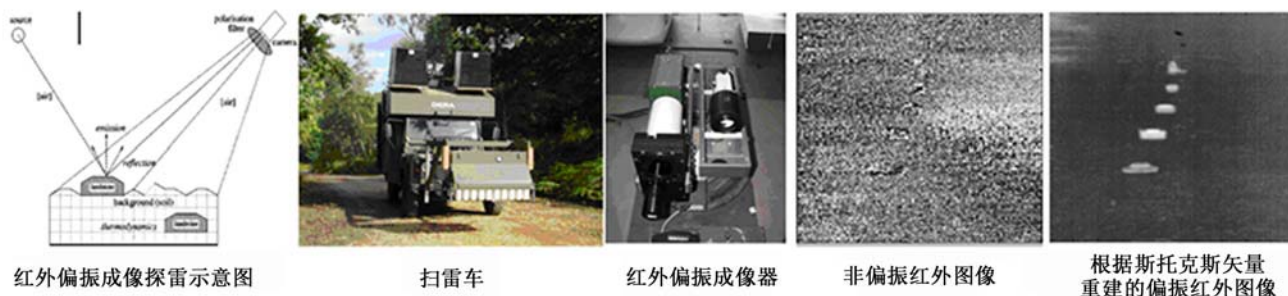


图5 利用红外偏振成像技术进行扫雷实验研究

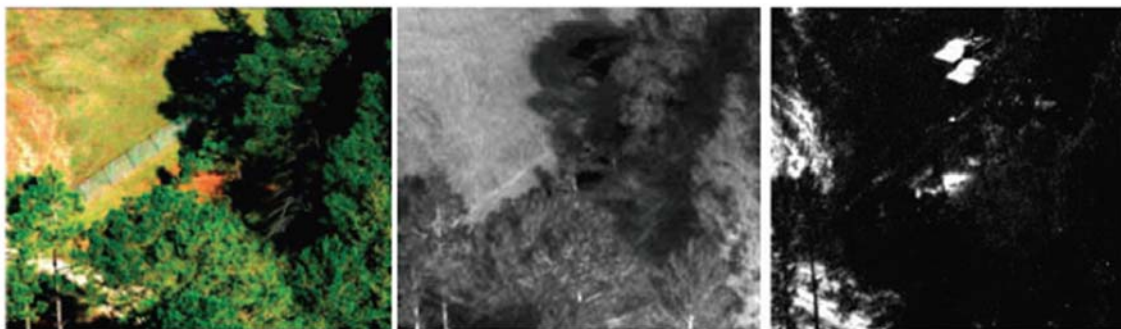


图 6 多光谱可见光图像 (左) ; 长波红外图像 (中) ; 红外偏振图像 (右)

果方面明显优于非偏振红外成像技术。

图 6 所示为利用长波红外偏振成像技术探测隐藏在复杂背景丛林中车辆的实验情况^[10]。其中,可见光图像和非偏振红外图像受背景等因素影响较大,但红外偏振成像技术则可较好地目标从复杂背景中分离出来,提高了对目标的探测能力。

4 结束语

与传统的热成像技术相比,红外偏振成像技术在探测伪装目标时可以获得更多的细节特征,体现出了其特有的优越性。随着传统的热成像技术对伪装目标探测难度的不断增加,通过分析偏振图像的信息已经能够更好地对目标进行识别。因此,红外偏振成像技术在军事目标检测和目标识别应用中具有很重要的价值。

参考文献

- [1] 赵永强, 张洪才, 潘全. 基于偏振特征的目标检测[J]. 量子电子学报, 2003, 20(6): 1.
- [2] 聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 63.
- [3] Goan Forssell. Passive IR Polarization Measurements Applied to Covered Surface Landmines [C]. SPIE, 2003, 5089: 547-557.
- [4] 徐参军, 赵劲松, 蔡毅, 等. 红外偏振成像的几种技术方案[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 264-265.
- [5] 徐参军, 苏兰, 杨根远, 等. 中波红外偏振成像图像处理及评价[J]. 红外技术, 2009, 31(6): 365-366.
- [6] 申强, 朱永平. 引信红外偏振成像探测机理及关键技术[J]. 光子技术, 2008, 34(2): 314.
- [7] 柳继勇, 张聘义, 肖仁鑫, 等. 一种偏振红外图像的像素级融合算法[J]. 红外与激光技术, 2007, 36(S2): 288.
- [8] 付立冬, 姜学军, 谭小波. 红外图像特征提取方法研究[J]. 科技信息, 2009, 29(15): 495.
- [9] Nicola Playle, Daniel Port, Robin Rutherford, et al. Infrared Polarisation Sensor for Forward Looking Mine Detection [C]. SPIE, 2002, 4742: 12-16.
- [10] Michael G G. Polarimetric Modeling of Remotely Sensed Scenes in the Thermal Infrared [D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2002.

新闻动态 News

德国军方采购法国 Thales 公司产 远距离致冷型热成像仪

据 www.militaryaerospace.com 网站报道, 法国 Thales 公司日前从德国军方获得了一份购买 10 套 Sophie XF 型远距离致冷型热成像仪的合同, 其具体金额并未对外透露。

Sophie XF 型热成像仪是一种集激光测距

仪、日光相机、集成式 GPS 接收器和数字罗盘位置传感器于一身的具有连续光学变焦能力的手持式多功能热成像仪。

德国军队计划将这种远距离热成像仪用于监视以及目标获取与识别, 以在夜间和可见光条件较差的情况下确定这些目标的具体位置。

Sophie XF 型热成像仪的特点是, 有多种测量与记录方式, 使用重量轻、寿命更长的电池, 噪声水平较低。

□ 岳桢千