

基于相似度的目标可见光谱段伪装效能评估

时萌玮¹, 闫钧华^{1*}, 徐国跃², 张寅¹, 胡旭彤¹, 钱淇²¹南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 211106;²南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106

摘要 伪装目标与背景的综合相似度能够衡量伪装目标与周围背景之间的特征差异, 综合相似度越高, 目标与背景的融合程度越高, 目标伪装效能越高。组合使用目标及背景图像的亮度、颜色、纹理、形状、尺寸、结构、直方图等 7 个典型特征来表征目标伪装特性, 采用与其相应的相似度量法得到各个特征相似度, 采用熵权法客观确定不同特征指标权重, 线性加权得到伪装目标与背景的综合相似度, 从而获得量化的目标伪装效能评估结果。不同背景、不同侦察距离、不同目标姿态下的多组实验表明: 所提伪装目标与背景的综合相似度具有与目标发现概率一致性、与探测距离一致性、背景鲁棒性, 证明了所提方法的正确性和有效性; 并通过对比实验验证了该方法的可靠性。

关键词 伪装效能评估; 综合相似度; 可见光谱段; 伪装目标; 熵权法

中图分类号 TP751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230828

Research on the Evaluation of Target Camouflage Effect in Visible Spectrum Based on Similarity

Shi Mengwei¹, Yan Junhua^{1*}, Xu Guoyue², Zhang Yin¹, Hu Xutong¹, Qian Qi²¹Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China;²College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China

Abstract The comprehensive similarity between the camouflage target and the background can measure the feature difference between the camouflage target and the surrounding background. The higher the comprehensive similarity, the higher the fusion degree between the target and the background, and the higher the camouflage efficiency of the target. In this paper, seven typical features of target and background images, including brightness, color, texture, shape, size, structure, and histogram, are used to represent the camouflage characteristics of the target. The corresponding similarity measurement method is used to obtain the similarity of each feature. The entropy weight method is used to objectively determine the weights of different feature indicators, and the comprehensive similarity between the camouflage target and background is obtained by linear weighting. Thus, the quantitative evaluation results of target camouflage effectiveness can be obtained. Multiple experiments under different backgrounds, different reconnaissance distances and different target attitudes show that the comprehensive similarity between the camouflage target and the background proposed in this paper is consistent with the target discovery probability, consistent with the detection distance, and robust to the background, which proves the correctness and effectiveness of the proposed method. The reliability of the proposed method is proved by comparison experiment.

Key words camouflage effectiveness evaluation; comprehensive similarity; visible light; camouflage target; entropy method

1 引言

伪装与侦察技术竞争式发展, 在全天候、多层次、宽波段、高精度的侦察监视威胁下, 装备伪装技术成为

现代武器装备至关重要的高新技术。对目标伪装效能进行有效评估, 既可促进高价值军事装备伪装技术的发展, 又可促进目标侦察技术的发展^[1-3]。基于此, 本文提出一种基于相似度的目标可见光谱段伪装效能评

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-04-21; 录用日期: 2023-06-25; 网络首发日期: 2023-07-05

通信作者: *yjh9758@126.com

估方法,提取亮度、颜色、纹理等特征描述伪装目标与背景间的暴露特性,采用熵权法确定特征权重,加权得到伪装目标与背景的综合相似度,实现对目标伪装效能的定量评估^[4-5]。

国内外学者开展了一系列目标伪装效能评估研究。2018年,Pike^[6]利用视觉显著性量化动物目标伪装效能,符合人类的视觉感知机制,但给定目标的视觉显著性在不同环境下存在很大差异,特别是光照强度、阴影等特征,会影响目标的伪装效能。2018年,Xue等^[7]通过融合与背景相关的特征和前景目标的内部特征,利用非线性融合策略来定量评估目标和周围背景的差异程度,能够更准确地模拟各指标之间的复杂关系,科学分析各指标的贡献,但仅提取了显著性图作为背景相关特征,需要确定更多的特征来全面描述伪装图案的本质。2019年,李中华等^[8]通过引入指标贡献度和标准差的多指标权重分配算法确定结构、纹理等特征权重,提高了权重分配的精度,但该算法在不同战场环境下的适用性和有效性有待验证。2020年,Bai等^[9]基于图像颜色相似度和梯度幅度相似度分析目标和背景的颜色和纹理差异,利用信息熵得到目标伪装效能,目标命中率和检测时间均优于其他方法,但是目标、背景类别较少,缺少更多的伪装刺激。2022年,Mondal^[10]讨论了伪装目标的设计、评估和破碎边缘技术,客观评价技术包括显著性模型、全局杂波度量模型等,基于单一特征难以准确提取目标,缺乏客观性。

国内外学者还开展了不同影响因子下目标伪装效能评估的研究。2015年,王博等^[11]通过实验得到随着探测距离增大,明显目标、涂覆迷彩目标、遮挡伪装目标的信噪比随之降低,光谱识别能力降低,目标发现概率明显下降,但未考虑人体目标。2017年,郭子淳等^[12]建立了基于改进 Johnson 准则的光学成像侦察卫星对地面机动目标的检测概率模型,研究表明目标检测概率与目标几何尺寸、卫星和目标间距离成正比,但该算法未针对研究地面伪装目标。2018年,Chen等^[13]通过海洋伪装目标图像数据构建了目标发现概率与相似度的数学模型,解决了现有的效果评价方法依赖专家判断而缺乏客观性的问题,但该算法缺乏实际实验验证,样本数据量有待增加。2018年,王鹏焱等^[14]分析了不同的地物方位角、太阳高度角以及探测角度对陆基条件下地物光谱曲线的影响,但是没有从侦察图像角度分析影响因子变化下目标伪装效能。现有目标伪装效能评估野外实验存在以下 3 个问题:1)野外场景复杂,有林地、砖石、土壤、植被等各种场景,现有研究多在某一场景下开展评估;2)伪装目标多样,有伪装样板、伪装人员、伪装网、伪装车辆等,且人员姿态多变,现有研究多针对单一类型目标开展评估,且多为站立状伪装人员;3)敌方侦察手段多样,有无人机航拍、手持相机拍摄等,现有研究多针对单一侦察手段拍摄图像开展评估。

综上所述,本文基于人眼视觉注意机制组合亮度、颜色、纹理、形状、尺寸、结构、直方图等 7 个典型特征来全面评估目标伪装效果,然后使用熵权法客观确定各个特征的权重,避免主观个体干扰,最后将多维特征权重与特征相似度加权得到目标与背景的综合相似度,有效评估各个场景下的目标伪装效能。目前国内外学者已研究了多个目标伪装效能评估方法,但是基本没有进行野外实验以验证背景变化、侦察距离变化、目标姿态变化下评估方法的有效性。基于此,本文以伪装样板和身穿伪装服的人员作为伪装目标,开展丰富的野外实验以验证所提方法的优越性,验证伪装目标与背景的综合相似度与目标发现概率的一致性、探测距离的一致性、背景鲁棒性。

2 目标伪装效能评估方法

所提基于相似度的目标可见光谱段伪装效能评估方法框图如图 1 所示。伪装目标与背景的综合相似度能够衡量伪装目标与周围背景之间的特征差异,综合相似度越高,目标与背景的融合程度越高,目标伪装效能越高。提取目标及背景图像的亮度、颜色、纹理、形状、尺寸、结构、直方图等 7 个典型特征来表征目标伪装特性,采用与其相应的相似度量法得到各个特征相似度,采用熵权法确定不同特征指标权重,线性加权得到伪装目标与背景的综合相似度,从而获得目标伪装效能评估结果。

2.1 目标/背景特性表征及其相似度

目标/背景特性是指目标及其所处环境的固有属性,如几何形状、光谱颜色等,伪装目标与背景间的特性差异决定了图像上两者间的特征差异,提取亮度特征、颜色特征、纹理特征、形状特征、尺寸特征、FSIM 特征、直方图特征等 7 个光学特征,利用相似度量法量化目标与背景间的特征相似度,更加科学全面地评估目标的伪装效能。采用 Criminisi 修复算法^[14]修复背景图像,并截取目标位置处的九宫格图像作为背景。

2.1.1 亮度相似度

亮度特性是目标和背景反映在探测器上的视觉特性,目标与背景的亮度差异越大,越容易引起视觉注意^[4]。颜色的感觉是由于三原色 R、G、B 刺激的综合结果。在三原色系统中,红绿蓝的刺激量分别以 R、G、B 表示,形成 RGB 彩色模型。CIEXYZ 是定义一切颜色空间的基准,它既属于基色颜色空间,也属于色、亮分离颜色空间,是贯穿两者的枢纽。XYZ 是 RGB 三基色刺激值,与设备无关,其中,国际照明委员会定义 Y 值为亮度。CIELAB 颜色空间既不依赖于光线也不依赖于颜料,通过数字化方式来描述视觉感应,基于 CIEXYZ 颜色空间,CIELAB 颜色空间的亮度计算公式如下:

$$L = \begin{cases} 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16, & Y/Y_0 > 0.008856 \\ 903.3(Y/Y_0), & Y/Y_0 \leq 0.008856 \end{cases}, \quad (1)$$

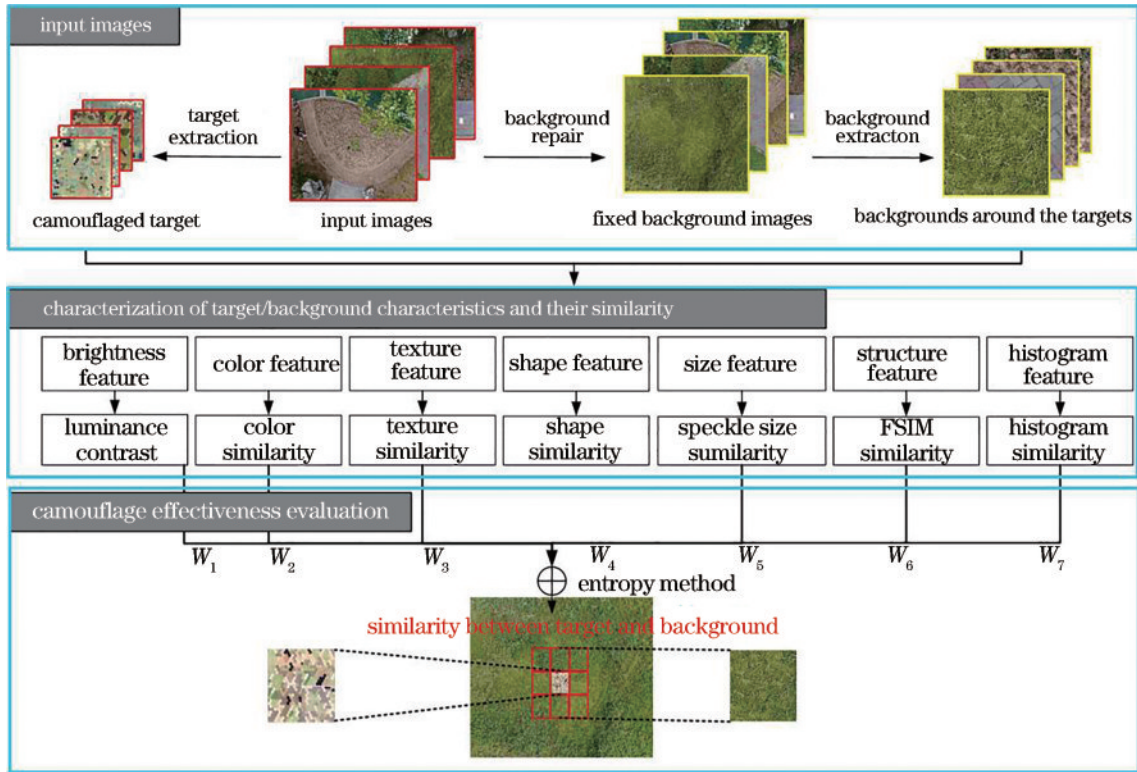


图 1 基于相似度的目标可见光谱段伪装效能评估总体框图

Fig. 1 General block diagram of target camouflage effect evaluation in visible spectrum based on similarity

式中: Y 是 CIEXYZ 空间的三刺激值亮度; Y_0 是参考白色光的辐射亮度, 在标准光源 D65 照明下, 取 $Y_0=100$ 。亮度相似度 (S_L) 计算如下:

$$S_L = 1 - \left| \frac{L_t - L_b}{L_b} \right|, \quad (2)$$

式中: L_t 是目标区域亮度; L_b 是背景区域亮度。亮度相似度的取值范围是 0~1, 值越接近 1, 表示目标与背景的亮度差异越小。

2.1.2 颜色相似度

颜色表征物体表面对光谱的不同反射情况, 目标与背景的颜色分布越相似, 与背景的融合程度越高, 颜色特征稳定, 不受图像旋转、平移、尺度变化的影响, 对背景变化表现出很强的鲁棒性^[8]。所提方法基于灰度直方图匹配来度量伪装目标和背景的颜色相似度, 记背景图像和伪装图像分别为 B 和 T , 分别对彩色图像进行色彩分离得到 R、G、B 三通道, 背景图像 B 的 3 个 RGB 分量的一维归一化直方图为 HR_B 、 HG_B 、 HB_B , 伪装图像 T 的 3 个 RGB 分量的一维归一化直方图为 HR_T 、 HG_T 、 HB_T , 利用式 (3) 分别计算 R、G 和 B 直方图的颜色相似度 $\text{Sim}(HR_B, HR_T)$ 、 $\text{Sim}(HG_B, HG_T)$ 和 $\text{Sim}(HB_B, HB_T)$ 。

$$\text{Sim}(H_B, H_T) = \frac{\sum_i \min[H_B(i), H_T(i)]}{\min \left\{ \sum_i \min[H_B(i)], \sum_i \min[H_T(i)] \right\}}, \quad (3)$$

式中: i 为直方图分量。三通道平均得到最终颜色相似度 (S_C) 的计算公式:

$$S_C = \frac{\text{Sim}(HR_B, HR_T) + \text{Sim}(HG_B, HG_T) + \text{Sim}(HB_B, HB_T)}{3}. \quad (4)$$

颜色相似度的取值范围是 0~1, 值越接近 1, 表示目标与背景的颜色差异越小。

2.1.3 纹理相似度

纹理是物体表面细节的总称, 是所有物体表面都具有的内在特性, 边缘纹理区域能反映图像大部分细节信息^[15]。野外场景中不同伪装目标的拍摄条件保持一致, 拍摄气候条件是春季晴朗天气、微风、日照强度中等, 且野外实验中目标上方和前方没有任何遮挡。照明环境不变, 物体表面是漫反射的前提条件下, 纹理特征不依赖于颜色或亮度变化, 对于噪声有较强的抵抗能力, 能体现物体粗糙度、方向性、重复性等视觉属性。纹理是由空间位置上灰度分布的反复交替变化所形成的, 因此在图像中, 相隔某种距离的两个像素间在灰度上存在对应关系, 表现为图像中灰度的相关特性。而灰度共生矩阵正是研究图像上相邻像素格之间灰度级分布关系的矩阵, 具有计算量少而不影响提取特征效果的优点。因此, 所提方法利用灰度共生矩阵来描述伪装目标与背景间的纹理相似度, 灰度共生矩阵是由图像灰度级之间的联合概率密度 $p(i, j, d, \theta)$ 构成的矩阵, $p(i, j, d, \theta)$ 是共生矩阵第 i 行第 j 列元素的值, 它

是以灰度级 i 为起点,在给定空间距离 d 和方向 θ 时出现灰度级 j 的概率。纹理特征矢量 $S_{T/b} = \{E, I, H, C\}$, 主要包括能量(E)、对比度(I)、熵值(H)、相关性(C)。

$$E = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j)^2, \quad (5)$$

$$I = \sum_{n=0}^{L-1} n^2 \left[\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j) \right], \quad (6)$$

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j) \lg [p(i, j)], \quad (7)$$

$$C = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{ijp(i, j) - u_1 u_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2}, \quad (8)$$

式中: $u_1 = \sum_{i=0}^{L-1} i \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j)$; $u_2 = \sum_{i=0}^{L-1} j \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j)$; $\sigma_1 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - u_1)^2 \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j)$; $\sigma_2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - u_2)^2 \sum_{j=0}^{L-1} p(i, j)$ 。采用高斯归一化方法计算特征分量值的均值 m 和标准差 σ , 将特征值归一化到 $[0, 1]$:

$$S_{T/b} = \left(\frac{S_{T/b} - m}{3\sigma} + 1 \right) / 2. \quad (9)$$

利用曼哈顿距离计算伪装目标和背景图像的纹理相似度:

$$S_T = \sum_{i=1}^m |S_{T_i} - S_{T_b}| \quad (10)$$

式中: S_{T_i} 是目标图像纹理特征值; S_{T_b} 是背景图像纹理特征值。纹理相似度的取值范围是 $0 \sim 1$, 值越接近 1, 表示目标与背景的纹理差异越小。

2.1.4 形状相似度

形状是分割图像中目标/背景的外界线, 主要由明度和色彩的突变引起, 通过边界对比加强轮廓使物体的外形更加清晰^[16]。经过伪装后, 物体的边缘形状变得不明显, 与背景的融合程度较高。形状特征不随图像的颜色或灰度细节变化, 具有较好的稳定性和良好的平移、旋转、缩放等空间几何不变性。采用 7 个 Hu 不变矩描述形状特征, 将形状特征向量归一化, 利用欧氏距离度量伪装目标与背景形状特征向量的相似度, 形状相似度(S_{S1})计算公式如下:

$$S_{S1} = 1 - \text{norm} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n |S_{S1i} - S_{S1b}|^2} \right), \quad (11)$$

式中: S_{S1i} 是目标图像形状特征矢量; S_{S1b} 是背景图像形状特征矢量。形状相似度的取值范围是 $0 \sim 1$, 值越接近 1, 表示目标与背景的形状差异越小。

2.1.5 尺寸相似度

尺寸轮廓可分为斑点核心单元间的轮廓和目标样件的整体轮廓, 斑点轮廓影响斑点之间的衔接及图案的色彩渐变, 从而暴露目标^[17]。迷彩伪装图案设计中不同比例的颜色斑块混合从而改变目标外形,

在伪装学上多色迷彩混为单色之间的距离即为有效伪装距离, 斑块尺寸反映了目标的伪装能力。采用基于小波分解的多尺度特征描述斑点尺寸特征, 对图像进行多层小波分解, 比较不同层次上目标和背景的低频图像纹理特征, 可以较好地反映迷彩图案在不同探测距离上的伪装效果。采用 db4 小波作为 Mallat 分解与重构的母小波对图像进行三层小波分解, 统计各层次的低频分量得到斑点尺寸特征, 将斑点尺寸特征向量归一化, 利用曼哈顿距离计算伪装目标和背景间尺寸相似度(S_{S2}):

$$S_{S2} = \sum_{i=1}^m |S_{S2i} - S_{S2b}| \quad (12)$$

式中: S_{S2i} 是目标图像归一化斑点尺寸特征矢量; S_{S2b} 是背景图像归一化斑点尺寸特征矢量。尺寸相似度的取值范围是 $0 \sim 1$, 值越接近 1, 表示目标与背景的尺寸差异越小。

2.1.6 FSIM 相似度

基于底层特征的特征相似度评估算法(FSIM)相比 SSIM 引入 HVS 对图像特征理解的优先度概念, 位于物体轮廓的像素有助于更好理解目标结构^[18]。其中, 相位一致性特征(PC)可以很好刻画图像局部结构且对于图像的变化具有相对不变性, 梯度特征(GM)能表征图像在强度或颜色方向的边缘信息变化, 将获取的特征相结合得到 FSIM, 计算公式如下:

$$\text{FSIM} = \frac{S_{PC}(x, y) \cdot S_G(x, y) \cdot PC_m(x, y)}{\sum_{x, y \in \Omega} PC_m(x, y)}, \quad (13)$$

$$S_{PC}(x, y) = \frac{2PC(x) \cdot PC(y) + T_1}{PC^2(x) + PC^2(y) + T_1}, \quad (14)$$

$$S_G(x, y) = \frac{2G(x) \cdot G(y) + T_2}{G^2(x) + G^2(y) + T_2}, \quad (15)$$

式中: $PC_m(x, y) = \max[PC(x), PC(y)]$, 用于对图像 x, y 整体的相似性进行加权; $S_{PC}(x, y)$ 表示图像 x, y 的特征相似性; $S_G(x, y)$ 表示图像 x, y 的梯度相似性; PC 表示图像 x, y 的相位一致性信息; G 表示图像 x, y 的梯度幅值; 引入常量 T_1 和 T_2 避免出现分母为零的情况。FSIM 的取值范围是 $0 \sim 1$, 值越接近 1, 表示伪装目标与背景间的结构特征差异越小。

2.1.7 直方图相似度

伪装目标和背景图像均由像素点集合组成, 图像直方图是图像像素数据分布的统计学特征, 是图像的基本属性, 描述了图像中灰度分布情况, 能够直观展示图像中灰度级概率分布^[19]。点特征是图像的重要特征, 具有旋转不变性和不随光照条件变化的优点, 提取图像点特征不会损失重要的特征信息。采用余弦相似度度量伪装目标和背景图像直方图间的相似性(S_H), 计算公式如下:

$$S_H = \cos \theta = \frac{\mathbf{S}_{Ht} \cdot \mathbf{S}_{Hb}}{\|\mathbf{S}_{Ht}\| \cdot \|\mathbf{S}_{Hb}\|}, \quad (16)$$

式中： \mathbf{S}_{Ht} 是伪装目标图像直方图特征矢量； \mathbf{S}_{Hb} 是背景图像直方图特征矢量。直方图相似度的取值范围是0~1,值越接近1,表示目标与背景的直方图差异越小。

2.2 目标/背景综合相似度

熵权法是一种客观赋权法,克服了人为因素的影响,所提方法采用熵权法客观确定组合得到的多维特征中各个特征相似度的权重系数,线性加权得到目标与背景的综合相似度,对目标伪装效能进行定量评估。这样既可避免主观确定权重算法受决策者主观影响大,存在较强的个体干扰,又可避免非线性确定权重算法缺乏足够的数据量及样本划分困难问题^[20]。

熵权法的基本思路^[8]是根据指标数据变异性的夫小来确定客观权重,指标序列数值的差异越大,信息熵值越小,该项特征的分配权重越大。利用熵权法计算目标与背景综合相似度的步骤如下:

1) 评价指标数据标准化。目标评价指标体系记为 $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 待评价目标 m 个, 记为 $\mathbf{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, 则指标决策矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

2) 计算第 i 个目标的第 j 个指标的比重:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}. \quad (18)$$

3) 计算第 j 个指标的信息熵:

$$e_{ij} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, 0 \leq e_{ij} \leq 1. \quad (19)$$

4) 计算第 j 个指标的权重:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n 1 - e_j}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (20)$$

指标权重确定后即可明确具体背景下各个指标对综合相似度的影响程度。

5) 加权计算具体背景下伪装目标与背景的综合相似度:

$$S = \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot w_j, \quad (21)$$



(a) vegetation background



(b) vegetation/Soil background



(c) soil background



(d) artificial masonry background

图2 不同背景区域下伪装样板图像

Fig. 2 Camouflage template images in different backgrounds

式中： S 为综合相似度。 S 的取值范围是0~1,值越接近1,伪装目标和背景图像越相似,伪装效能越高。

3 实验结果与分析

进行不同背景、不同侦察距离、不同目标姿态下的多组实验,验证伪装目标与背景的综合相似度具有与目标发现概率一致性、与探测距离一致性、背景鲁棒性,从而验证所提目标伪装效能评估方法的正确性和有效性。还将所提方法与基于光谱反射率曲线的评估方法、基于色差仪的评估方法进行了对比实验,验证了其可靠性。

3.1 实验数据

野外实验中将不同伪装目标放置于不同水平/垂直探测距离下的不同背景区域中,可见光图像由Dji M300RTK多旋翼无人机搭载ZENMUSE H20T相机镜头在伪装目标的正上方不同垂直探测距离下拍摄以及手持相机在伪装目标的正前方不同水平探测距离下拍摄。

实验背景复杂多样,包括土壤、植被、砖石、林地等典型军事背景;实验伪装目标主要包括不同涂层的伪装样板、身穿不同伪装服的人员;实验气候条件是春季晴朗天气、微风、日照强度中等。

3.2 不同垂直探测距离下涂层样板伪装效能评估

将1#~5#伪装样板固定放置于植被、植被/土壤、土壤、人造砖石等4种典型背景区域,1#是纯铝基板,2#是90%荒漠系正四边形核心单元迷彩伪装样板,3#是60%荒漠系正六边形核心单元迷彩伪装样板,4#是80%植被系正四边形核心单元迷彩伪装样板,5#是90%植被系正六边形核心单元迷彩伪装样板。无人机飞于伪装样板正上空12 m、17 m、22 m、27 m、32 m、42 m、52 m,同地面呈垂直角度拍摄图像,4种典型背景区域图像如图2所示。植被背景不同垂直探测距离下伪装样板图像如图3所示,其中,图3(ai)~(ei)是不同垂直探测距离下无人机拍摄图像,1H(H:探测距离)是探测距离12 m,2H是探测距离17 m,3H是探测距离22 m,4H是探测距离27 m,5H是探测距离32 m,6H是探测距离42 m,7H是探测距离52 m。

所提方法计算得到的植被背景不同垂直探测距离下5种伪装样板的伪装效能评估结果如表1所示。目标与背景的综合相似度排序结果中“1”表示伪装效能

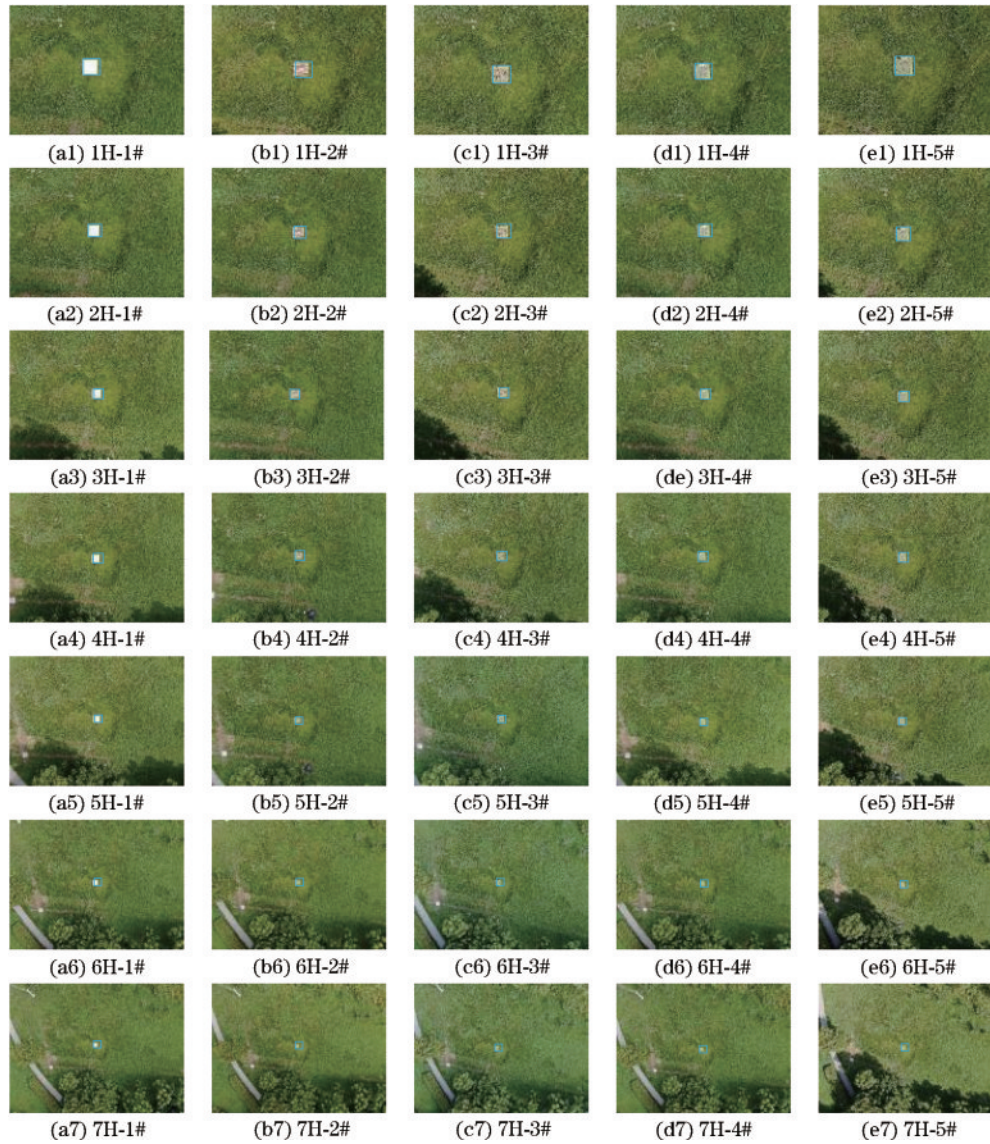


图 3 植被背景不同垂直探测距离下伪装样板图像

Fig. 3 Camouflage template images under different vertical detection distances in vegetation background

表 1 植被背景不同垂直探测距离下 5 种伪装样板的伪装效能评估结果

Table 1 Camouflage effectiveness evaluation results of five camouflage templates under different vertical detection distances in vegetation background

	Distances	1#	2#	3#	4#	5#
Comprehensive similarity	1H	0.4073	0.6765	0.7087	0.7112	0.7336
	2H	0.4392	0.6849	0.7108	0.7145	0.7395
	3H	0.5069	0.6859	0.7142	0.7212	0.7428
	4H	0.5450	0.6972	0.7286	0.7340	0.7464
	5H	0.5521	0.7257	0.7314	0.7458	0.7571
	6H	0.5699	0.7309	0.7485	0.7513	0.7601
	7H	0.6010	0.7425	0.7506	0.7587	0.7714
Camouflage efficiency ranking		5	4	3	2	1

最高,“5”表示伪装效能最低,“2、3、4”表示伪装效能介于最高与最低之间。

表 1 表明,同一背景不同垂直探测距离下 5 种伪装样板的伪装效能排序结果一致,验证了所提方法具有

探测距离一致性。同一伪装样板,综合相似度随着垂直探测距离的增加而增大,其原因是随着垂直探测距离的增加,同一伪装样板在图像中所占像素数减少,导致样板与背景的特征更为相似。

所提方法计算得到的不同垂直探测距离下 5 种伪装样板在植被、植被/土壤、土壤、人造砖石典型背景下

的伪装效能评估结果如表 2 所示。

表 2 典型背景不同垂直探测距离下 5 种伪装样板的伪装效能评估结果

Table 2 Camouflage effectiveness evaluation results of five camouflage templates under different vertical detection distances in typical backgrounds

Camouflage efficiency ranking	Typical background	1#	2#	3#	4#	5#
	vegetation background	5	4	3	2	1
vegetation/soil background	5	4	2	3	1	
soil background	5	3	1	4	2	
artificial masonry background	5	3	4	2	1	

表 2 表明,不同背景、不同垂直探测距离下 5 种伪装样板的伪装效能排序结果不同,说明不同的伪装样板在不同背景下的伪装效能是不一样的,所提方法对于不同背景都能很好评估样板的伪装效能,验证了其具有背景鲁棒性。

利用 YOLO 目标检测识别算法^[21]计算同一背景不同垂直探测距离下 5 种伪装样板的发现概率,将其与综合相似度进行拟合,得到伪装样板的发现概率与综合相似度的拟合曲线,如图 4(图 4 中不包含 1#纯铝基板)所示。图 4 表明,同一背景同一垂直探测距离下伪装样板的综合相似度与发现概率呈负相关,即综合相似度越高,伪装效能越高,发现概率越低,验证了所提伪装目标与背景的综合相似度具有与目标发现概率一致性,所提方法能够有效地评价样板的伪装效能。

3.3 不同垂直探测距离下伪装服人员伪装效能评估

将 1#~6#身穿不同伪装服的人员以不同姿态处在植被/土壤背景区域,地面草地分布稀疏不一,1#是身穿雪地系伪装服趴伏人员,2#是身穿植被/土壤系伪装服趴伏人员,3#是身穿林地系伪装服站立人员,4#是身穿植被系伪装服半蹲人员,5#是身穿林地/土壤系伪装服半蹲人员,6#是身穿土壤系伪装服蹲姿人员。无人机飞于人员正上空 40 m、60 m、80 m、100 m、120 m 距

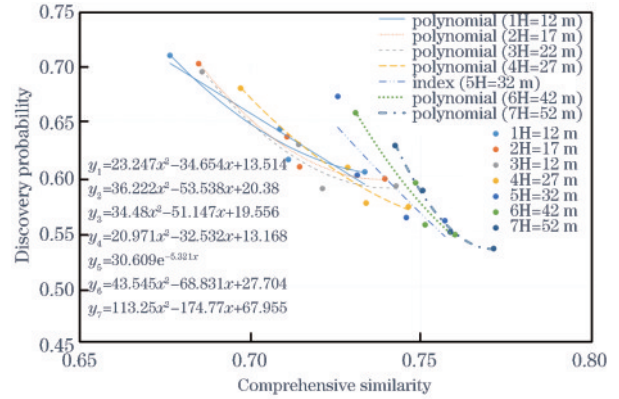


图 4 不同垂直探测距离下伪装样板的综合相似度与发现概率拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of synthetic similarity and discovery probability of camouflage templates under different vertical detection distances

离,同地面呈垂直角度拍摄图像,植被/土壤背景不同垂直探测距离下伪装服人员图像如图 5 所示,截取的伪装服人员和背景图像如图 6 所示,其中,图 6(ai)~(li)是不同垂直探测距离下无人机拍摄伪装服人员和周围背景图像,1H 是探测距离 40 m,2H 是探测距离 60 m,3H 是探测距离 80 m,4H 是探测距离 100 m,5H 是探测距离 120 m。

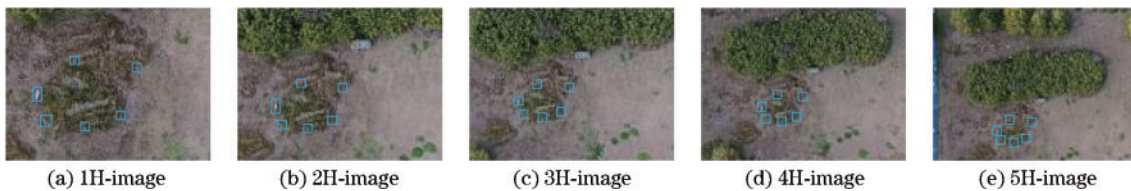


图 5 植被/土壤背景不同垂直探测距离下伪装服人员图像

Fig. 5 Camouflage personnel images under different vertical detection distances in vegetation/soil background

所提方法计算得到的植被/土壤背景不同垂直探测距离下 6 种伪装服人员的伪装效能评估结果如表 3 所示。目标与背景的综合相似度排序结果中“1”表示伪装效能最高,“6”表示伪装效能最低,“2、3、4、5”表示伪装效能介于最高与最低之间。

表 3 表明,同一背景不同垂直探测距离下 6 种伪装服人员的伪装效能排序结果一致,验证了所提方法具

有探测距离一致性。同一伪装服人员,综合相似度随着垂直探测距离的增加而增大,其原因是随着垂直探测距离的增加,同一伪装服人员在图像中所占像素数减少,导致人员与背景的特征更为相似。

利用 YOLO 目标检测识别算法^[21]计算同一背景不同垂直探测距离下 6 种伪装服人员的发现概率,将其与综合相似度进行拟合,得到伪装服人员的发现概

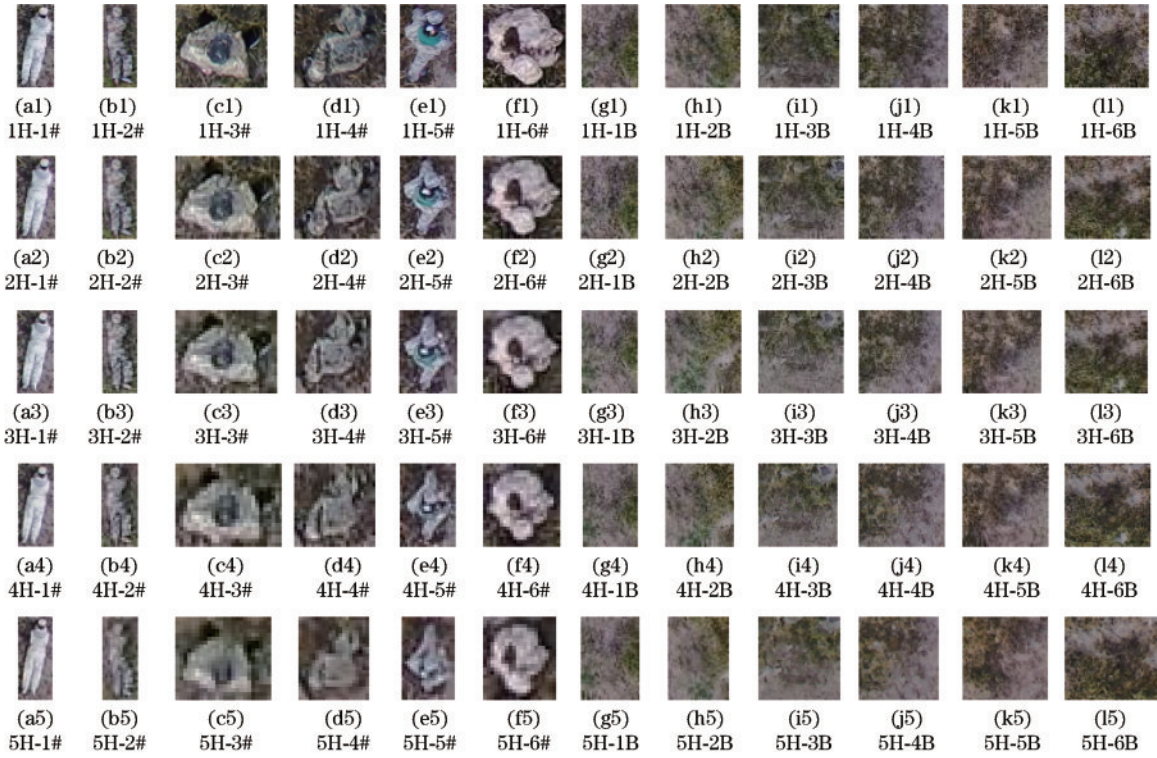


图 6 植被/土壤背景不同垂直探测距离下伪装服人员和背景图像

Fig. 6 Camouflage personnel and background images under different vertical detection distances in vegetation/soil background

表 3 植被/土壤背景不同垂直探测距离下 6 种伪装服人员的伪装效能评估结果

Table 3 Camouflage effectiveness evaluation results of six camouflage suits under different vertical detection distances in vegetation/soil background

	Distance	1#	2#	3#	4#	5#	6#
Comprehensive similarity	1H	0.7206	0.8356	0.8075	0.8333	0.7874	0.7572
	2H	0.7383	0.8438	0.8157	0.8497	0.7893	0.7593
	3H	0.7466	0.8647	0.8209	0.8516	0.8009	0.7632
	4H	0.7471	0.8929	0.8652	0.8558	0.8415	0.7782
	5H	0.7723	0.9003	0.8664	0.8780	0.8669	0.7790
Camouflage efficiency ranking		6	1	3	2	4	5

率与综合相似度的拟合曲线,如图 7 所示。图 7 表明,同一背景同一垂直探测距离下伪装服人员的综合相似

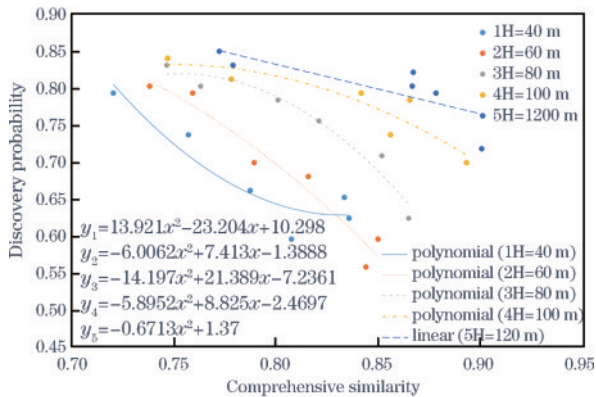


图 7 不同垂直探测距离下伪装服人员的综合相似性与发现概率拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of synthetic similarity and discovery probability of camouflage suits under different vertical detection distances

度与发现概率呈负相关,即综合相似度越高,伪装效能越高,发现概率越低,验证了所提的伪装目标与背景的综合相似度具有与目标发现概率一致性,所提方法能够有效评价伪装服人员的伪装效能。

3.4 不同水平探测距离下伪装服人员伪装效能评估

将 1#~3# 身穿不同伪装服的人员站立置于林地背景区域,1# 是未伪装人员,2# 是身披绿色伪装布料人员,3# 是身披星空迷彩伪装布料人员。手持相机置于人员正前方 5 m、10 m、20 m、30 m 距离,同地面呈水平角度拍摄图像,林地背景不同水平探测距离下伪装服人员图像如图 8 所示,截取的伪装服人员和背景图像如图 9 所示,其中,图 9(ai)~(di) 是不同水平探测距离下手持相机拍摄伪装服人员和周围背景图像,其中,1D(D:探测距离)是探测距离 5 m,2D 是探测距离 10 m,3D 是探测距离 20 m,4D 是探测距离 30 m。



图 8 林地背景不同水平探测距离下伪装服人员图像

Fig. 8 Camouflage personnel images under different horizontal detection distances in woodland background



图 9 林地背景不同水平探测距离下伪装服人员和背景图像

Fig. 9 Camouflage personnel and background images under different horizontal detection distances

所提方法计算得到的林地背景不同水平探测距离下 3 种伪装服人员的伪装效能评估结果如表 4 所示。目标与背景的综合相似度排序结果中“1”表示伪装效能最高，“3”表示伪装效能最低，“2”表示伪装效能介于最高与最低之间。

表 4 表明,同一背景不同水平探测距离下 3 种伪装服人员的伪装效能排序结果一致,验证了所提方法具有探测距离一致性。同一伪装服人员,综合相似度随着水平探测距离的增加而增大,其原因是随着水平探测距离的增加,同一伪装服人员在图像中所占像素数

表 4 林地背景不同水平探测距离下 3 种伪装服人员的伪装效能评估结果

Table 4 Camouflage effectiveness evaluation results of three camouflage suits under different horizontal detection distances in woodland background

	Distance	1#	2#	3#
Comprehensive similarity	1D	0.7118	0.7959	0.7409
	2D	0.7331	0.8110	0.7648
	3D	0.7649	0.8397	0.7734
	4D	0.7774	0.8490	0.7812
Camouflage efficiency ranking		3	1	2

减少,导致人员与背景的特征更为相似。

利用 YOLO 目标检测识别算法^[21]计算同一背景不同水平探测距离下 3 种伪装服人员的发现概率,将其与综合相似度进行拟合,得到伪装服人员的发现概率与综合相似度的拟合曲线,如图 10 所示。图 10 表明,同一背景同一水平探测距离下伪装服人员的综合

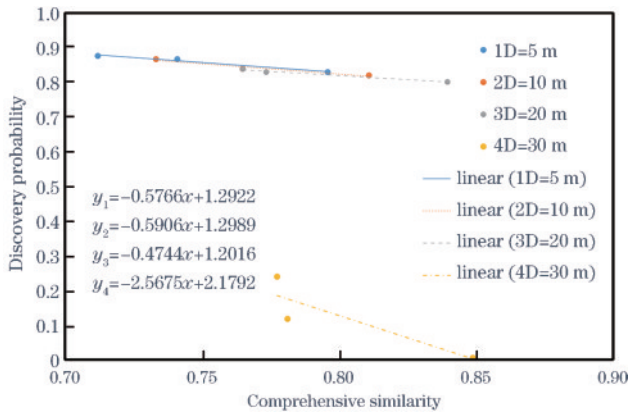


图 10 不同水平探测距离下伪装服人员的综合相似度与发现概率拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of synthetic similarity and discovery probability of camouflage suits under different horizontal detection distances

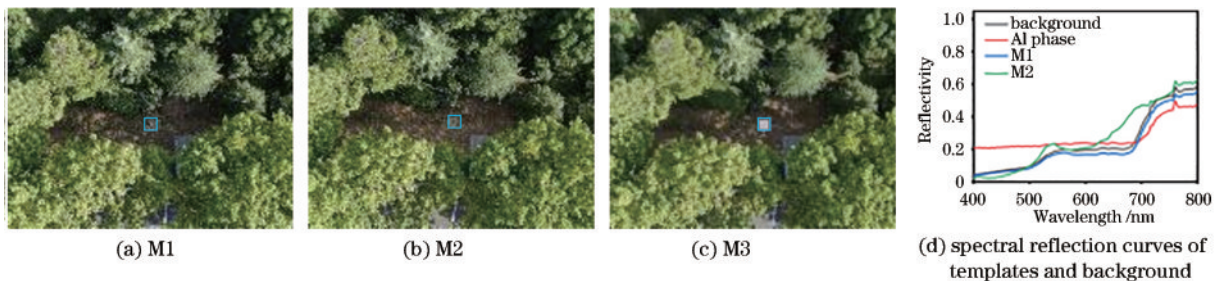


图 11 样板图像与光谱反射率曲线

Fig. 11 Template images and spectral reflection curves

表 5 表明,针对相同伪装目标,3 种方法得到的目标伪装效能排序结果一致,M1 样板的伪装效能最高,M2 样板的伪装效能中等,纯铝基板的伪装效能最差,验证了所提方法的可靠性。但上述两种方法经济成本

相似度与发现概率呈负相关,即综合相似度越高,伪装效能越高,发现概率越低,验证了所提伪装目标与背景的综合相似度具有与目标发现概率一致性,所提方法能够有效评价人员的伪装效能。

3.5 对比实验

将所提方法与基于光谱反射率曲线的评估方法^[18]、基于色差仪的评估方法^[18]进行对比实验,验证其的可靠性。参照文献^[18],将纯铝基样板、正四边形迷彩基本单元样板 M1、正六边形迷彩基本单元样板 M2 置于植被/土壤背景中,无人机拍摄高度为 42 m,获得的样板图像如图 11(a)、(b)、(c)所示。基于色差仪的评估方法利用色差仪测量目标和背景的色差,色差仪使用 CIE $L^*a^*b^*$ 色彩空间作为设备连接空间来计算在这个三维空间内目标与背景两种颜色之间的距离差,即色差值(ΔE),计算公式如式(22)所示。色差单位是 CIE $L^*a^*b^*$,其中, L^* 表示色调的亮度, a^* 和 b^* 分别表示红绿色度和黄蓝色度。

$$\Delta E = \sqrt{(L_t - L_b)^2 + (a_t - a_b)^2 + (b_t - b_b)^2} \quad (22)$$

式中: L_t, a_t, b_t 分别是目标在 CIE $L^*a^*b^*$ 空间的亮度与颜色参数; L_b, a_b, b_b 分别是背景在 CIE $L^*a^*b^*$ 空间的亮度与颜色参数。 ΔE 色差值越小表示目标与背景的颜色差别越小,值越大则差别越大。

基于光谱反射率曲线的评估方法利用光谱测量仪对目标和背景进行光谱反射率曲线测量,进而利用光谱角计算目标与背景的相似度。上述两种评估方法都需要依靠仪器辅助测量,所测得的目标与背景差异准确可靠,因此将所提方法与两者的评估结果进行一致性分析。利用光谱仪测量得到样板与背景的光谱反射率曲线,如图 11(d)所示。3 种方法的伪装效能评估结果如表 5 所示。所提方法数值越接近 1,伪装效能越高;基于光谱反射率曲线的评估方法数值越接近 1,伪装效能越高;基于色差仪的评估方法数值越小,伪装效能越高。

高。所提方法基于可见光图像,利用视觉机制提取伪装目标区域与背景的特征差异进行判断,评估速度快,经济成本低,易于实现。

表 5 3 种方法的伪装效能评估结果

Table 5 Camouflage effectiveness evaluation results of three methods

Camouflage effectiveness evaluation methods	M1	M2	Al plate
Method of this article (comprehensive similarity)	0.8836	0.8819	0.5118
Evaluation method based on spectral reflectance curve (spectral angle)	0.9956	0.9449	0.8011
Evaluation method based on color difference meter (average color difference)	50	52	74
Camouflage efficiency ranking	1	2	3

4 结 论

基于人眼视觉注意机制组合亮度、颜色、纹理、形状、尺寸、结构、直方图等 7 个典型特征来全面评估目标伪装效果,然后使用熵权法客观确定多维特征的权重,最后将特征权重与特征相似度加权得到目标与背景的综合相似度,从而定量评估不同背景下伪装目标的伪装效能。不同背景、不同侦察距离、不同目标姿态下的多组实验表明:所提伪装目标与背景的综合相似度具有与目标发现概率一致性、与探测距离一致性、背景鲁棒性,证明了所提目标伪装效能评估方法的正确性和有效性;对比实验证明了其可靠性。据此既可促进高价值军事装备伪装技术的发展,又可促进目标侦察技术的发展。

本文研究了可见光谱段的目标伪装效能评估,随着伪装与侦察技术谱段的扩展,后续将深入研究雷达和红外谱段的目标伪装效能评估,进一步促进高价值军事装备伪装技术和目标侦察技术的发展。

参 考 文 献

- [1] 王荣昌,王峰,任帅军,等.基于双流融合网络的单兵伪装偏振成像检测[J].光学学报,2022,42(9):0915001. Wang R C, Wang F, Ren S J, et al. Polarization imaging detection of individual camouflage based on two-stream fusion network[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0915001.
- [2] 谢家豪,黄树彩,韦道知,等.空天红外探测系统对无人机集群探测能力分析[J].光学学报,2022,42(18):1812002. Xie J H, Huang S C, Wei D Z, et al. Detectability analysis of air-space infrared detection system for UAV swarm[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1812002.
- [3] 余毅,刘震宇,孙志远,等.靶场光电测量设备发展现状及展望[J].光学学报,2023,43(6):0600002. Yu Y, Liu Z Y, Sun Z Y, et al. Development status and prospect of photoelectric measurement equipment in range[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0600002.
- [4] 甘源滢,刘春桐,李洪才,等.光学图像伪装效果评估研究现状及关键问题[J].应用光学,2019,40(6):1050-1058. Gan Y Y, Liu C T, Li H C, et al. Research status and key issues of optical image camouflage effectiveness evaluation[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 1050-1058.
- [5] 汪克亮,刘志刚,王艺婷,等.目标光学伪装效果评价方法综述[C]//国家安全地球物理丛书(十六)——大数据与地球物理.西安:西安地图出版社,2020:155-161. Wang K L, Liu Z G, Wang Y T, et al. Review on evaluation methods of target optical camouflage effect [C]//National security Geophysics Series (16)—Big Data and Geophysics. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 2020:155-161.
- [6] Pike T W. Quantifying camouflage and conspicuousness using visual salience[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(8): 1883-1895.
- [7] Xue F, Wu F, Wang J W, et al. Camouflage texture design based on camouflage performance evaluation[J]. Neurocomputing, 2018, 274: 106-114.
- [8] 李中华,喻钧,胡志毅,等.一种迷彩伪装效果评价指标权重分配算法[J].火力与指挥控制,2019,44(10):49-54. Li Z H, Yu J, Hu Z Y, et al. A weight allocation algorithm of camouflage evaluation index[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(10): 49-54.
- [9] Bai X Q, Liao N F, Wu W M. Assessment of camouflage effectiveness based on perceived color difference and gradient magnitude[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4672.
- [10] Mondal A. Camouflage design, assessment and breaking techniques: a survey[J]. Multimedia Systems, 2022, 28(1): 141-160.
- [11] 王博,高玉斌,鲁旭涛.基于光谱探测与图像识别的反伪装目标系统研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(5):1440-1444. Wang B, Gao Y B, Lu X T. Research on anti-camouflaged target system based on spectral detection and image recognition[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(5): 1440-1444.
- [12] 郭子淳,姜毅,李静,等.光学侦察卫星对地机动目标侦察性能的评估[J].现代防御技术,2017,45(6):131-137. Guo Z C, Jiang Y, Li J, et al. Evaluation of reconnaissance performance of optical satellites for ground maneuvering targets[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(6): 131-137.
- [13] Chen Z, Ni J, Zhang L, et al. Research on relation model of optical camouflage similarity and identification probability of marine targets[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10797: 107970W.

- [14] 王鹏辉, 赵德辉, 李明锋. 基于图像修复技术的目标可见光伪装效果评价[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031011.
Wang P Y, Zhao D H, Li M F. Optical camouflage effect assessment based on digital image inpainting technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031011.
- [15] 文刘强, 吕绪良, 荣先辉. 基于视觉特性及图像相似度的光学伪装效果评估[J]. 防护工程, 2012, 34(1): 22-26.
Wen L Q, Lü X L, Rong X H. Optical camouflage assessment based on visual characteristics and image similarity[J]. Protective Engineering, 2012, 34(1): 22-26.
- [16] 应家驹, 何永强, 陈玉丹, 等. 基于特征综合的红外动态伪装效果评估[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 407-411.
Ying J J, He Y Q, Chen Y D, et al. Evaluation of infrared dynamic camouflage effect based on feature synthesis[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 407-411.
- [17] 赵晓枫, 吴飞, 徐叶斌, 等. 基于改进梯度相似度的红外隐身伪装评价方法[J]. 电光与控制, 2022, 29(2): 7-11.
Zhao X F, Wu F, Xu Y B, et al. An infrared stealth camouflage evaluation method based on improved gradient similarity[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(2): 7-11.
- [18] Xu C, Liu C Y, Fang G, et al. Design, preparation and performance evaluation of core unit in multispectral camouflage coating[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 121: 104013.
- [19] Guo L, Chen W L, Liao Y, et al. Multi-scale structural image quality assessment based on two-stage low-level features[J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(4): 1101-1110.
- [20] Wang L, Zhou Y, Li Q, et al. Application of three deep machine-learning algorithms in a construction assessment model of farmland quality at the County scale: case study of Xiangzhou, Hubei Province, China[J]. Agriculture, 2021, 11(1): 72.
- [21] 王杨, 曹铁勇, 杨吉斌, 等. 基于YOLO v5算法的迷彩伪装目标检测技术研究[J]. 计算机科学, 2021, 48(10): 226-232.
Wang Y, Cao T Y, Yang J B, et al. Research on camouflage target detection technology based on YOLO v5 algorithm[J]. Computer Science, 2021, 48(10): 226-232.