

基于背景分割法的数码迷彩 设计及伪装性能评估

吴忠倪^{1a,1b} 张丽平^{1a,1b} 柯莹^{1c} 付少海^{1a,1b,2}

1. 江南大学 a. 纺织科学与工程学院, b. 生态纺织教育部重点实验室, c. 设计学院, 江苏 无锡 214122;
2. 国家先进印染技术创新中心, 山东 泰安 271000

摘要:针对自然环境中作战人员及军事设备的伪装隐蔽性问题,提出了一种基于背景分割法的数码迷彩设计方法。首先,通过分析环境场景的特征,采用特征提取技术,确定最佳的迷彩图案元素。其次,利用背景分割法进一步细化数码迷彩图案的色彩分布占比,使数码迷彩图案置于环境场景的任意位置都能保持良好的伪装隐蔽效果。最后,运用 ResNet-50 深度神经网络模型和 Mask R-CNN 迷彩目标分割模型对基于背景分割法设计得到的数码迷彩图案进行伪装隐蔽性能评价。结果表明,相比于传统迷彩设计方法,此方法得到的数码迷彩图案的伪装隐蔽性能显著提升,隐蔽融合度均值提高至 99.00% 以上,环境场景的相似度提高 20.41%,平均分割识出率降低 82.21%。

关键词: 数码迷彩;背景分割;伪装隐蔽性能;伪装评价;神经网络;隐蔽融合度;相似度;分割识出率

中图分类号:TS 941;E 919

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)03-0026-07

Digital camouflage design and camouflage performance evaluation based on background segmentation method

Wu Zhongni^{1a,1b}, Zhang Liping^{1a,1b}, Ke Ying^{1c}, Fu Shaohai^{1a,1b,2}

- a. College of Textile Science and Engineering, b. Key Laboratory of Ecological Textile, Ministry of Education, c. School of Design, 1. Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
2. National Innovation Center of Advanced Dyeing and Finishing Technology, Tai'an 271000, Shandong, China

Abstract: A digital camouflage design method based on background segmentation was proposed to address the camouflage concealment issues of personnel and military equipments in natural environment. Firstly, by analyzing the characteristics of environmental scenes and employing feature extraction techniques, the optimal elements of camouflage pattern were determined. Secondly, the color distribution ratio of digital camouflage pattern was further refined using background segmentation, ensuring that the digital camouflage pattern could maintain effective camouflage concealment regardless of its position in the environmental scene. Finally, the deep neural networks model ResNet-50 and camouflage target segmentation model Mask R-CNN were utilized to evaluate

基金项目:基于数字喷墨印花技术迷彩伪装织物及工艺装备研发(ZJ2021A08)

收稿日期:2023-12-08

作者简介:吴忠倪,女,1998年生,在读硕士研究生,主要研究方向为迷彩隐身

通信作者:付少海,教授,shaohaifu@hotmail.com

the camouflage concealment performance of digital camouflage patterns designed based on background segmentation. The results indicated a significant improvement in the concealment effectiveness of digital camouflage compared to traditional camouflage generation method. The mean fusion fitness exceeded 99.00%, the environmental scene similarity increased by 20.41%, and the mean pixel-wise true positive decreased by 82.21%.

Keywords: digital camouflage; background segmentation; camouflage concealment performance; disguised evaluation; neural network; fusion fitness; similarity; pixel-wise true positive

迷彩在军事、野外作业等领域具有重要意义,它可以增加目标物体在特定环境中的隐蔽性,减少被探测和识别的风险。迷彩图案的发展经历了保护迷彩、变形迷彩、仿造迷彩、仿生迷彩和数码迷彩等 5 个阶段^[1]。其中,数码迷彩是由数码成像技术和图像处理技术结合生成的多色块状单元构成的^[2],它具有斑块立体化、纹理层次化和边缘模糊化等特征,在军事伪装领域得到了广泛应用。

目前,数码迷彩纹理设计方法分 2 种。一种是基于自然环境的设计方法。该方法以伪装目标所处的自然环境为基础,通过建立纹理库,并在设计时从纹理库中提取纹理单元,再排列组合,得到伪装图案。庄梦颖^[3]通过分水岭分割法^[4]分割背景,提取了迷彩纹理表,并建立了基准线网格,从而使迷彩产生了错落、无序、叠加的效果,降低了可视度。但该方法缺乏定量分析过程,主观性较强。李春彦等^[5]提取了不同背景下高融合度轮廓,并建立了通用轮廓库,应用时可从轮廓库随机选取轮廓并迁移至目标环境。但该色彩填充方式使得主色分布过于粗略,不能适应环境的各个部分。另一种是基于深度学习网络的设计方法。例如,随着人工智能的发展, Yang 等^[6]基于对抗网络模型提出了一种形态学处理算法,并建立了可生成数字迷彩图案的设计模型。Alfimtsev 等^[7]根据现有迷彩样式,通过深度卷积对抗网络(deep convolution generative adversarial networks)^[8]生成了不同的迷彩图案。这些方法证明了深度学习技术在数码迷彩设计领域具有借鉴意义。

基于以上研究,本文提出一种基于背景分割法的迷彩设计方法,即主要运用计算机视觉技术和图像处理技术,结合混色和视错觉理论,设计生成全新的数码迷彩。该数码迷彩在背景融合度和分割识出率 2 项评价指标上都有较为出色的表现,在实际运用中可以使己方军事人员及设备更好地与战场环境

背景融合,降低军事活动中被敌方发现的概率。

1 迷彩设计方法

1.1 背景分割法

在数码迷彩设计中,颜色的占比及其分布是影响伪装效果的重要因素。在实际军用伪装网中,存在一种拼花伪装网。这种伪装网通过拼接颜色各异的单块伪装网以适应不同使用场景,提高利用率并节约成本。为精确掌握各主色在数码迷彩图案中不同位置的分布和占比,实现更强的伪装效果,本文参考该拼花伪装网设计方法,提出了一种新型迷彩主色占比的确定方法,即在运用图像处理软件 Photoshop 对环境场景图片分别进行 2×2、3×3、3×4 等分分割(图 1)后,分别提取图片主色并计算其占比,再以此为依据展开迷彩伪装图案的色彩设计。具体分割过程及其特点如下:

(1) 2×2 四点分割法。该法简单直接,其将图片分割为 4 个相等的区域,每个区域都对应一个特定的迷彩图案,以更好地适应不同区域的环境特征。这种分割方法适用于较为简单或单一的环境。

(2) 3×3 九点分割法。该法相比四点分割法更加精细,其将图片划分为 9 个更小的区域。这种分割方式可以涵盖更多的细节和变化空间,使得迷彩图案能够更好地模拟复杂的环境场景,具有更强的隐蔽性能。

(3) 3×4 十二点分割法。该法在保持一定水平方向细节的同时,增加了垂直方向的分割,进一步提升了迷彩图案对环境的适应性和隐蔽性,适用于需要高度适应性的场合。

相对于传统的迷彩设计方法,背景分割法可以使迷彩主色的分布更加细化和精准。此外,在背景的不同位置,背景分割法可实现设计得到的数码迷

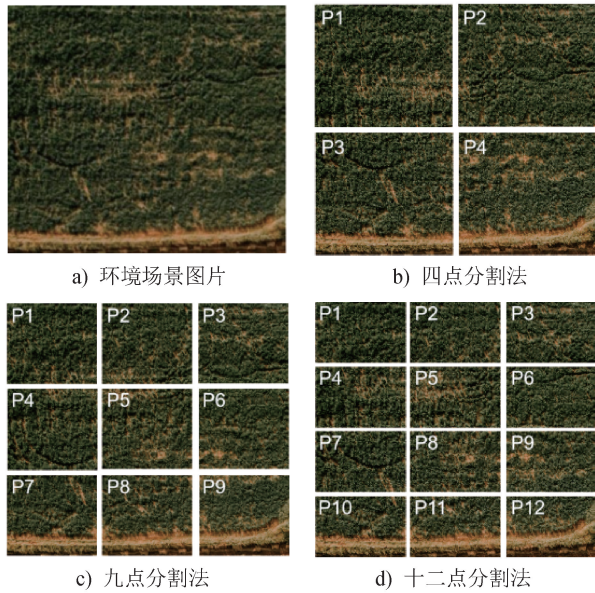


图1 环境场景及分割法分割示例
Fig.1 Example of environmental scene and segmentation method

彩图案具有良好的伪装隐蔽效果,提高了数码迷彩的伪装隐蔽水平。

1.2 色彩提取与分析

1.2.1 色彩提取

运用 K-means 聚类主色提取^[9]算法,对选取的环境场景图像进行整体环境主色提取,即通过遍历所有像素并对其计数,统计图像中每个主要颜色的像素数量,计算得出各主色占比。提取过程的颜色空间转换值如表1所示。

表1 目标主色颜色空间转换值

Tab.1 Target primary color space conversion value

颜色空间	森林绿色	橄榄绿色	黑色	黄土色
RGB	R:56 G:54 B:29	R:91 G:88 B:57	R:20 G:23 B:6	R:146 G:123 B:79
	RGB ↔ XYZ ↔ Lab			
Lab	L:22 a:-2 b:16	L:37 a:-3 b:18	L:7 a:-4 b:8	L:53 a:5 b:27

表1中,森林绿色通常用于模仿树叶和植被的颜色;橄榄绿色用于模仿树干和地面上腐叶的颜色,帮助融入森林地貌;黑色通常用于增加深度和阴影,

帮助迷彩图案隐藏在树林中;黄土色包括不同程度的棕色、灰色和土壤颜色,模仿地面的颜色。

1.2.2 色彩分析

运用背景分割法对环境场景图像进行主色提取与占比计算,结果如表2所示。

表2 主色占比均值

Tab.2 Mean of main color proportion

分割方法	森林绿色	橄榄绿色	黑色	黄土色
四点分割法	0.31	0.25	0.39	0.05
九点分割法	0.47	0.25	0.24	0.04
十二点分割法	0.31	0.24	0.40	0.05
整体环境主色提取法	0.42	0.21	0.31	0.06

由表2可知:从主色颜色角度考虑,背景分割法结果与整体环境主色提取法一致,均为森林绿色、橄榄绿色、黑色和黄土色;从主色占比均值角度考虑,3种分割法中,橄榄绿色和黄土色都与整体环境主色提取法相近,而森林绿色和黑色则与整体环境主色提取法有显著差异。

1.3 背景分割方法选择

使用背景分割法提取主色时,分割区域细化程度的不同将导致每个区域包含的环境因素各不相同,因此各主色在不同区域的占比也不一致。

图2展示了图1b)四点分割法所得各部分的主色占比。可以发现,在四点分割法中,各部分的主色占比相对关系均为黑色>森林绿色>橄榄绿色>黄土色,而整体环境主色提取法结果为森林绿色>黑色>橄榄绿色>黄土色(表2),二者不一致。

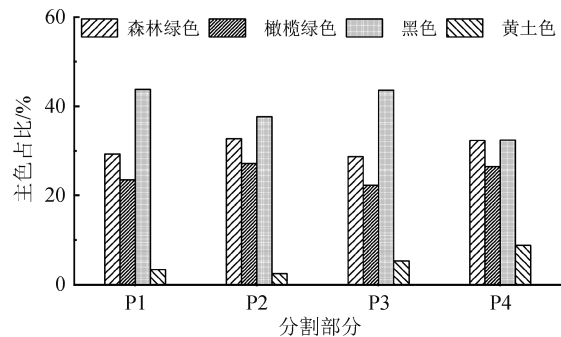


图2 四点分割法主色占比

Fig.2 Main color proportion of four-point segmentation method

图3展示了图1c)九点分割法所得各部分的主色占比。可以发现,各部分主色占比最高的均为森林绿色,而黄土色、橄榄绿色和黑色的占比相对关系在不同的区域有不同的表现。这是由于,相对于主

色占比相对关系较为稳定的四点分割法,九点分割法的分割过程更加细化,导致各主色的占比关系产生了更大的波动。但从均值角度看,九点分割法所得森林绿色大于黑色的主色占比相对关系,与整体环境主色提取法的结果一致。

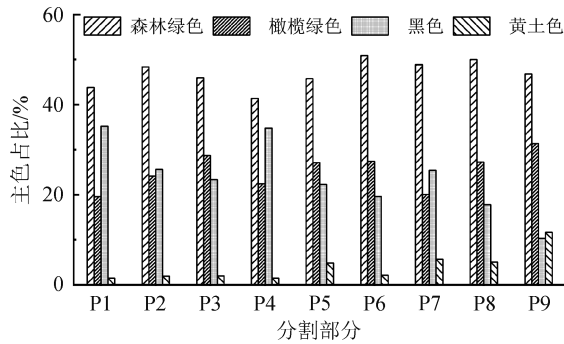


图 3 九点分割法主色占比

Fig. 3 Main color proportion of nine-point segmentation method

图 4 展示了图 1d) 十二点分割法所得各部分的主色占比。可以看出,各部分主色占比相对关系与四点分割法的一致,与整体环境主色提取法和九点分割法的结果不一致。

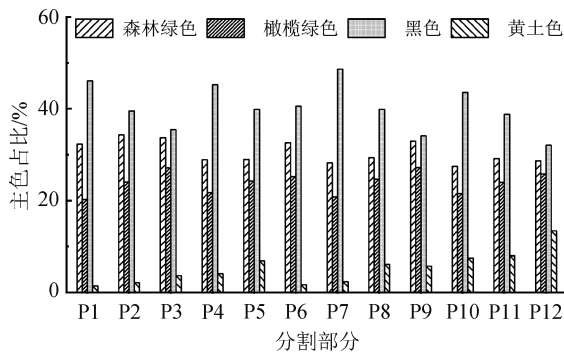


图 4 十二点分割法主色占比

Fig. 4 Main color proportion of twelve-point segmentation method

综上所述,3 种分割方法中橄榄绿色、黑色和黄土色与整体环境主色提取法所得占比差值的绝对值相差无几;而在森林绿色的占比均值上,九点分割法与整体环境主色提取法的差值仅为 0.05,而其他 2 种分割法的差值绝对值为 0.11。可见,九点分割法的主色占比相对关系与整体环境主色提取法的最为一致。

上述分析表明,九点分割法可以更准确地捕捉不同区域的环境色彩特征,提高伪装性能的一致性和可靠性。因此,在后续的数码迷彩设计中,

使用九点分割法获得的主色占比来指导设计,可获得更加自然和隐蔽效果的数码迷彩图案。设计思路如下:

如图 1c) 和图 3 所示,在 P1、P2、P4 和 P7 中,由于丛林阴影较多,森林绿色和黑色的占比明显较高;在 P3、P5、P6、P8 和 P9 中,森林绿色和橄榄绿色占比较高,丛林阴影相比于其他区域较少,故黑色占比下降明显。值得注意的是,在 P5、P7、P8、P9 中,由于道路和裸露土地的出现,黄土色占比相对其他区域显著增加。因此,迷彩设计过程中,在 P1、P2、P4 和 P7 区域,应提高森林绿色和黑色模块占比;在 P3、P5、P6、P8 和 P9 区域,应减少黑色的使用;在 P5、P7、P8、P9 区域,应提高黄土色模块占比。为了使设计过程更具简便性,同时减少工作量,在颜色占比数据较为近似的 P3 和 P6、P1 和 P4 区域使用相同的区域设计图。

1.4 迷彩设计流程

数码迷彩设计包括迷彩基本单元尺寸计算、背景纹理提取和数码迷彩设计。

1.4.1 迷彩基本单元尺寸计算

人眼最小的视角分辨率为 $0.000\ 297\ \text{rad}$ ~ $0.000\ 125\ \text{rad}$,当 $\alpha < 0.000\ 297\ \text{rad}$ 时,超出人眼视角分辨率,人眼无法识别 2 个数码迷彩单元,发生空间混色现象,使数码迷彩图案融入环境中。因此,运用数码迷彩单元两中心连线距离 x 的计算式确定迷彩基本单元尺寸^[10]:

$$x = 2d \times \tan \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

式中: α ——人眼的视角分辨率,rad;

d ——侦察距离,m。

在人眼的观察视角为 $0.000\ 297\ \text{rad}$ 、侦察距离为 50 m 时,计算得到数码迷彩单元两中心连线距离 $x = 0.371\ 25\ \text{cm}$ 。

1.4.2 背景纹理提取

运用 canny 算子^[11]边缘检测技术,对若干张林地环境图片进行检测,结果如图 5 所示。观察结果发现,林地环境多树干和叶片,其多为细长形边缘形态,且纹理和形态非常破碎、模糊。仿照其边缘样式,选取六边形^[10]为数码迷彩设计基本单元,展开数码迷彩设计。

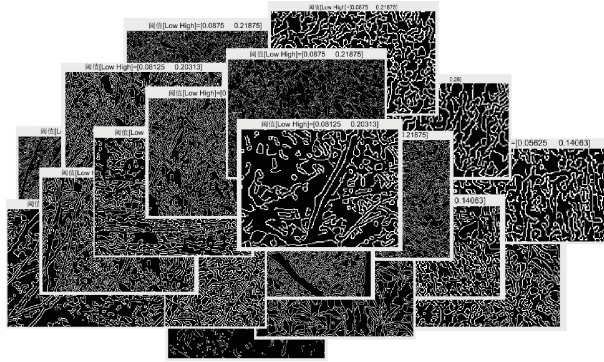
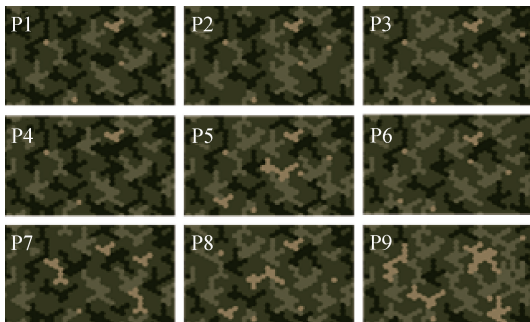


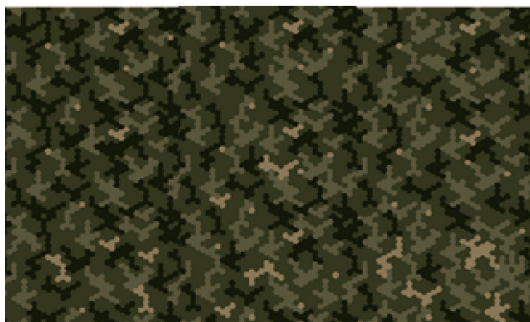
图5 林地场景 canny 算子边缘检测结果
Fig. 5 Edge detection results of woodland scene canny operator

1.4.3 数码迷彩设计

基于以上分析,依据九点分割法提取得到主色占比,再填充迷彩单元纹理,展开数码迷彩设计。设计流程包括排布迷彩单元纹理、填充纹理、生成各部分数码迷彩图案、拼合图案等。将得到的最终数码迷彩图案命名为 N 图。数码迷彩伪装图案设计结果如图 6 所示。



a) 九点分割法设计结果



b) N图

图6 数码迷彩伪装图案设计结果
Fig. 6 Digital camouflage image design results

为在后续伪装隐蔽性能评估中提升试验结果的说服力,本文还运用 K-means 迷彩生成方法得到了针对环境背景的传统四色数码迷彩图案,命名为 K

图,如图 7 所示。

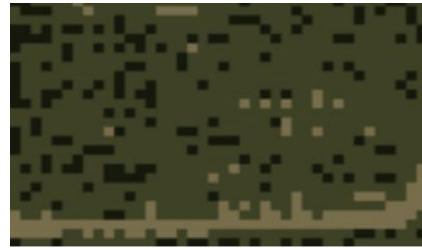


图7 传统四色数码迷彩图案
Fig. 7 Traditional four-color digital camouflage pattern

2 伪装隐蔽性能评估

2.1 融合度计算

采用 ResNet-50 深度神经网络^[12]模型,对前文获得的数码迷彩图案及环境场景图像进行特征提取,计算二者深度神经网络特征相似度,即余弦相似度,利用相似度衡量迷彩伪装图案的隐蔽融合度(F)。相应的计算式如下:

$$F = \frac{V_{bg} \times V_{bg+mc}}{V_{bg} \times V_{bg+mc}} \quad (2)$$

式中: V_{bg} ——环境场景图像特征向量;

V_{bg+mc} ——融入数码迷彩图案的环境场景图像特征向量。

每种情况均进行 10 次隐蔽融合度计算试验,并取 10 次试验得到的迷彩伪装图案的隐蔽融合度均值(\bar{F})和各数码迷彩图案与环境场景图像的相似度(R),作为伪装隐蔽性能指标。

2.2 分割识出率计算

2.2.1 迷彩目标分割模型训练

Mask R-CNN 迷彩目标分割模型训练过程如图 8 所示。首先通过无人机采集和网络搜索得到林地环境的航拍场景图像,从中选取 50 张作为环境场景图像,像素大小为 2 000×1 500。同时通过网络搜索到 40 张具有代表性的林地型数码迷彩图案,像素大小为 50×20。然后对环境场景图像进行数据增强。数据增强采用的方法包括空间位置变换、姿态角度变换以及光照明暗度均衡等。再与林地型数码迷彩图案进行仿真融合,得到初始的仿真训练样本。为提升训练模型性能,对初始的仿真训练样本采用基于图聚类的采样算法,选出具有代表性的样本图像,得到 30 000 张有效的仿真训练样本图像,并对

其进行迷彩目标区域语义标注。最后运用深度神经网络 Mask R-CNN 模型作为训练模型,进行 20 000 次的迭代训练,终得到用于测试的迷彩目标分割模型^[13-14]。

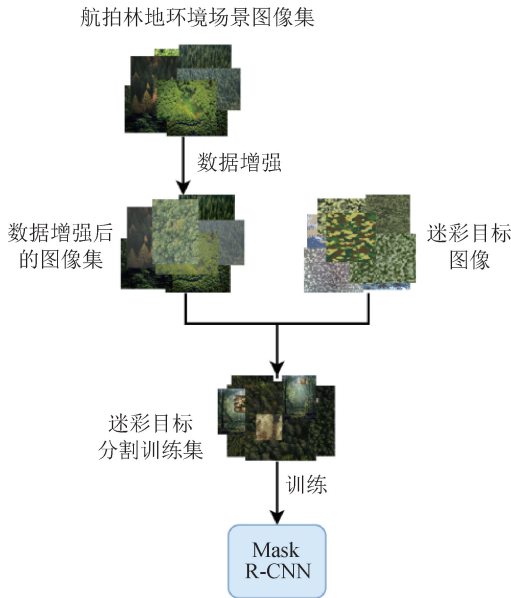


图 8 Mask R-CNN 模型训练过程

Fig. 8 Training process of Mask R-CNN model

2.2.2 评价指标

为定量评估数码迷彩图案的伪装性能,将前文的数码迷彩图案(图 6 和图 7)与图 1a)的环境场景图像仿真融合,得到一组多区域迷彩隐蔽结果仿真图像。运用训练好的迷彩目标分割模型对该多区域迷彩隐蔽结果仿真图像进行测试,得到分割识出率和分割图像结果。将仿真图像中的每个像素点作为计量单位,统计数码迷彩图案像素点的识别数量,计算目标像素点的分割识出率(P_T),获得数码迷彩图案随机分布于环境场景图像的平均分割识出率(\bar{P}_T)。其中分割识出率计算式如下:

$$P_T = \frac{T}{T + B} \quad (3)$$

式中: T 为数码迷彩图案中像素被正确识别的像素数; B 为环境场景图像中像素被识别为目标的像素数。

3 试验结果与分析

表 3 为数码迷彩图案隐蔽性能测试结果。对比发现在选定的环境场景中,基于九点分割法设计得

到的数码迷彩图案的多区域迷彩隐蔽结果仿真图像的融合度均值(\bar{F})达到 99.00%以上,与选定环境场景的相似度(R)为 68.95%,平均分割识出率(\bar{P}_T)仅为 15.47%。相比于传统的 K-means 数码迷彩生成方法,本文提出的数码迷彩设计方法在融合度均值(\bar{F})有小幅提升的同时,环境场景的相似度(R)提高了 20.41%,平均分割识出率(\bar{P}_T)降低了 82.21%,说明本文提出的基于九点分割法设计得到的数码迷彩图案的迷惑性和隐蔽性较强。

表 3 数码迷彩图案隐蔽性能测试结果

Tab. 3 Hidden performance test results of digital camouflage images

数码迷彩图案	$\bar{F}/\%$	$R/\%$	$\bar{P}_T/\%$
N 图	99.23	68.95	15.47
K 图	98.82	48.54	97.68

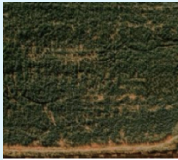









同时,为了更直接地展示所提方法的伪装性,对多区域迷彩隐蔽结果仿真图像的分割结果进行可视化呈现,给出了如表 4 所示的随机位置迷彩目标分割试验结果。在表 4 的测试输出图像中,有色部分为仿真图分割模型发现的迷彩目标区域,N 图只有 1 组被识别到,而 K 图的 5 组全部被识别到。表 4 的测试结果表明,基于九点分割法设计得到的数码迷彩图案,迷彩目标分割模型不能完全分割出迷彩目标区域,甚至无法发现迷彩目标区域。

由此可知,背景分割法相对于传统迷彩设计方法,优化了数码迷彩图案不同位置的色彩分布占比,使得数码迷彩图案置于环境场景的任意位置时都能保持良好的伪装隐蔽效果。

4 结论

本文提出了一种基于背景分割法的数码迷彩设计方法。该方法主要结合 canny 算子边缘检测理论及 K-means 主色提取算法,从主色占比的选取出发,结合迷彩小单元形状、尺寸、纹理等,设计得到了适用于选定背景的数码迷彩伪装图案。运用 ResNet-50 深度神经网络模型和 Mask R-CNN 迷彩目标分割模型,对基于背景分割法设计得到的数码迷彩伪装图案与传统数码迷彩伪装图案进行融合度及分割识出率对比,发现本文提出的迷彩设计方法所得数码迷彩图案,其隐蔽性与传统数码迷彩图案

表 4 隐蔽仿真图像的 Mask R-CNN 网络分割试验结果
Tab. 4 Experimental results of Mask R-CNN network segmentation of covert simulation images

组别	N 图	K 图
分割结果		
		
		
		
		

相比有显著提高,该方法的有效性经过了验证,可为数码迷彩伪装图案设计提供新思路。



参考文献

[1] 吴睿. 数码迷彩设计方法的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.

[2] 秦雷,胡江华,付天齐. 一种新的数码迷彩生成方法[J]. 光电技术应用,2013,28(5):33-35.
 [3] 庄梦颖. 基于视错觉理论装甲运兵车迷彩伪装设计[D]. 西安:西安工业大学,2021.
 [4] 白万民,郝阳,喻钧. 基于分水岭方法的数码迷彩设计[J]. 计算机与数字工程,2012,40(8):110-113.
 [5] 李春彦,王珍,罗毅,等. 迷彩伪装中基于背景的轮廓生成技术[J]. 信息记录材料,2019,20(12):74-75.
 [6] YANG X, XU W D, JIA Q, et al. Research on digital camouflage pattern generation algorithm based on adversarial autoencoder network [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 34(6):2050017.
 [7] ALFIMTSEV A N, SAKULIN S A, LOKTEV D A, et al. Hostis humani ET mashinae: adversarial camouflage generation [J]. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2019, 11: 382-392.
 [8] DENG C Y, DENG Z H, LU S, et al. Fault diagnosis method for imbalanced data based on multi-signal fusion and improved deep convolution generative adversarial network[J]. Sensors,2023,23(5):2542-2542.
 [9] 王文娟,崔佩璋,李召瑞. 基于 K-mean 的车辆伪装涂料漆膜颜色选取算法[J]. 现代电子技术,2023,46(1):54-58.
 [10] 贾其,吕绪良,李磊,等. 迷彩斑点单元形状和尺寸研究[J]. 光电技术应用,2008(1):21-23.
 [11] 喻钧,双晓. 仿造数码迷彩的设计方法[J]. 应用科学学报,2012,30(4):331-334.
 [12] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016: 770-778.
 [13] 李亮,陈广锋,丁彩红. 一种改进 Mask R-CNN 的化妆棉棉片缺陷检测方法[J]. 东华大学学报(自然科学版),2023,49(5):78-87.
 [14] 周颖,谢振平,蒋晓军. 基于演化计算的迷彩目标隐蔽策略仿真设计[J]. 兵工学报,2021,42(9): 1987-1997.

(上接第 18 页)

[10] 刘亚,王铃铃. 卫生用热风非织造布的质量探讨[J]. 产业用纺织品,2005,23(7):13-18.
 [11] 覃俊东. 热风法非织造布厚度提升研究[D]. 天津:天津工业大学,2017.

[12] 蒋卫华. 蚕丝/涤纶短纤维混纺纱及其针织物的性能研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
 [13] 秦雅伟. 夏作训林地迷彩织物的设计与服用性能研究[D]. 北京:北京服装学院,2015.