

数码迷彩图案设计成型及伪装效果评价研究进展

吴忠倪^{1,2}, 张丽平^{1,2}, 柯莹³, 付少海^{*1,2}

(1. 江南大学 江苏省纺织品数字喷墨印花工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学 设计学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:数码迷彩是由数码成像和图像处理技术相结合生成的多色块状单元所构成的迷彩图案, 在军事伪装领域运用广泛。为促进数码迷彩设计与评价领域完整体系的建立, 从数码迷彩图案设计、迷彩成型和伪装效果评价方面, 介绍数码迷彩的发展过程和发展现状, 总结目前研究中存在的问题, 展望未来发展趋势。研究认为, 当前数码迷彩研究聚焦于计算机模拟与虚拟环境评价, 实地应用评价欠缺。未来可运用喷墨印花技术及多功能墨水, 结合实地环境评价, 扩大数码迷彩在纺织服装领域的应用。

关键词: 数码迷彩; 军事伪装; 图案设计; 伪装效果评价

中图分类号: TS 941.1; E 919 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)02-0110-05

Research Progress of Digital Camouflage Pattern Design, Preparation and Camouflage Effect Evaluation

WU Zhongni^{1,2}, ZHANG Liping^{1,2}, KE Ying³, FU Shaohai^{*1,2}

(1. Jiangsu Engineering Research Center for Digital Textile Inkjet Printing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Eco-Textile, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. School of Design, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Digital camouflage, comprised of multicolored pixelated units generated through the integration of digital imaging and image processing technologies, forms camouflage patterns extensively utilized in the field of military deception. Currently, there are numerous imperfections in the domain of digital camouflage design and evaluation. In order to facilitate the establishment of a comprehensive research framework, this paper delved into the development process and current status of digital camouflage, focusing on aspects such as pattern design, camouflage formation, and the evaluation of deceptive effects. The article summarized existing challenges in current research and provided a glimpse into future developmental trends. The study shows that the current researches on digital camouflage primarily focus on computer simulation and evaluation in virtual environments, with a lack of evaluation in field applications. In the future, the application of digital camouflage in the textile and clothing industry can be expanded by utilizing inkjet printing technology and multifunctional inks, combined with field environmental evaluations.

Key words: digital camouflage, military camouflage, pattern design, evaluation of camouflage effect

可见光伪装是指在 0.40 ~ 0.76 μm 波段范围内对抗敌人侦察和制导设备, 使其产生错觉的光学

伪装。早期地面作战中, 部队主要选择与环境色相近的单色制成军服进行可见光伪装。近年来, 侦查

收稿日期: 2023-03-06; 修订日期: 2023-11-29。

基金项目: 教育部联合基金创新团队项目(8091B042115)。

作者简介: 吴忠倪(1998—), 女, 硕士研究生。

* 通信作者: 付少海(1972—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为数字喷墨印花技术、生物质纤维功能化改性技术和迷彩隐身面料的设计与开发技术等。Email: shaohaifu@hotmail.com

手段越来越精细化和高端化,对伪装技术也提出了更高的要求,可见光伪装也从单一色彩发展到颜色与层次更加多样化的迷彩伪装。

迷彩图案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 5 个阶段^[1-2]。最初的保护迷彩是由一种保护色构成的单色迷彩,伪装形式简单,主要依靠与周围环境色彩的融合实现伪装目的,在某些特定环境下具有一定的伪装效果。随着研究的深入,出现变色迷彩其由形状不规则的多色大斑点组成,斑点轮廓弯曲多样,伪装性能显著提高,被广泛应用在各国军服及装备中,也标志着迷彩伪装技术向多色、多形态的转变。随后,仿造迷彩的出现进一步丰富了迷彩伪装的形式,多数为模拟伪装目标所处环境色彩及纹理设计制成的迷彩图案,更适用于固定的伪装目标,提高了伪装效果。在仿造迷彩的基础上,仿生迷彩进一步提升了伪装技术的逼真度和有效性,通过模仿生物伪装特征设计迷彩图案,如虎纹迷彩、蛇纹迷彩等,使伪装目标更难以被察觉。

随着现代科技的发展,数码迷彩作为一种新型迷彩伪装技术应运而生。数码迷彩是利用像素化点阵形式,模仿背景图案的色彩、纹理及边缘信息,使迷彩单元边缘更加破碎、模糊,从而使伪装目标与背景很好融合的新型迷彩,其伪装效果超越了以前使用的迷彩图案,标志着迷彩伪装技术已经进入一个全新的数字化时代。因此,文中以数码迷彩为例,从迷彩图案设计、迷彩成型和伪装效果评价 3 方面,系统介绍数码迷彩的研究现状,总结目前研究中存在的问题,展望数码迷彩未来发展趋势。

1 数码迷彩设计

数码迷彩图案中像素点及其颜色的空间混色效应可产生视错觉^[3],从而模拟战场环境色彩和纹理信息。数码迷彩图案设计流程包含背景主色提取、迷彩小单元形状及尺寸确定、迷彩纹理设计 3 部分。

1.1 背景主色提取

迷彩颜色设计决定了迷彩图案与环境的融合度,是数码迷彩图案设计中的基础部分。选取与环境色尽可能相近的颜色作为迷彩图案的颜色,是增强伪装目标与环境融合度的关键,因此,合理提取环境色对迷彩图案设计至关重要。

1.1.1 颜色直方图法 通过统计环境色在颜色直方图中出现的频数来提取主色,以频数最大的几种

颜色为环境代表色。但由于图像中颜色种类较多,易导致直方图统计数目太大,计算量高,提取速度慢。因此,徐英^[4]提出以量化颜色的直方图为设计依据,将原图像中的颜色根据人眼视觉特性归类到较少数目的颜色区间,并通过设定阈值来减少直方图量化时间,完成主色的提取。该方案需要设定阈值,选择超过阈值的颜色作为图像主色,方法简单,但需人工确定主色,易受主观因素影响产生误差,同时工作效率较低^[5]。

1.1.2 K-means 聚类算法 给定一个数据点集合和需要的聚类数目 k (k 由用户指定),该算法根据某个距离函数反复把数据分入 k 个聚类中,以每个聚类中数据点的平均值作为新的聚类中心,直到同一聚类中两个数据点之间的距离小于用户设置的阈值,则终止迭代步骤,认为达到预期目标。该算法受选取初始聚类中心点的影响较大,在实际应用中一般都会对其进行改进。王文娟等^[6]提出一种基于 K-means 聚类算法的改进算法,随机选取标准色作为初始聚类中心,每经过一次 K-means 聚类迭代都将聚类中心更新为标准色,解决了聚类结果易出现标准色重复的问题。朱培恺等^[7]提出 K-means 聚类与密度思想融合算法,将聚类后数据点低密度区域进行单独聚类,把离散点抛出,减少了聚类误差,该算法将范围限制在了一个簇而不是整体数据中,计算量较小,运算速度低。相对于用颜色直方图提取主色,改进后的 K-means 聚类算法提取主色更加精确,速度更快。

1.1.3 其他方法 此外,科研人员还提出了其他主色提取法,喻钧等^[8]提出一种基于光谱色的主色聚类中心确定算法,该算法实现时间短,执行效率高,解决了用聚类算法提取主色导致的色度不稳定问题。

1.2 迷彩小单元的形状与尺寸

迷彩单元边缘破碎、模糊程度与迷彩图案和环境的融合度密切相关,迷彩单元越小,越容易产生空间混色效果,提升与环境的融合度。贾其等^[9]从单元形状设计原则出发,对正方形、三角形、平行四边形和正六边形的边缘伪装性进行了研究,发现正六边形作为小单元时迷彩图案的伪装效果更好。张杰宇等^[10]通过对人眼分辨率的研究,提出了一定距离下混色并产生视错觉的迷彩单元边长计算方法,具体公式为

$$x = 2d \times \tan \frac{\alpha}{2} = 2d \times \tan \frac{0.000\ 297 \times 180}{2\pi} = 0.000\ 074\ 25d。$$

(1)

式中: x 为迷彩单元边长; α 为人眼的观察视角; d 为侦察距离。

人眼视觉分辨范围在 $0.000\ 297\ \text{rad} \sim 0.000\ 125\ \text{rad}$ 之间,当 $\alpha < 0.000\ 297\ \text{rad}$ 时,超出人眼分辨率,人眼无法识别两个数码迷彩单元,会产生空间混色现象。当前对迷彩单元形状和尺寸的研究还有很多局限,随着科技发展,相关研究人员不应只局限于人眼视觉观察,也应将目光转向高空成像等远距离科技侦查。

1.3 迷彩纹理设计

纹理设计是影响迷彩图案伪装效果的因素之一,为达到伪装目的,迷彩图案应尽可能模仿无序、错落、立体的自然纹理。目前,数码迷彩纹理设计有两种方法。

1)以伪装目标所处的自然环境为基础建立纹理库,设计时从纹理库中提取纹理单元,排列组合得到伪装图案。庄梦颖^[11]以分水岭分割法分割背景,提取迷彩纹理表,并将表中的纹理单元与环境颜色一一对应后填入主色,同时建立单独的基准线网格,最后叠加生成迷彩图案。该方法可以使迷彩图案产生错落、无序、叠加的效果,提高与环境的融合度。李春彦等^[12]选取不同背景下出现较多的自然物轮廓,将融合度较好的纹理放到轮廓库中,建立了优质轮廓库。应用时根据环境条件,从优质轮廓库中随机选出一些常用的轮廓,仿照自然环境中自然物轮廓的布局方式,将其布局在画布上,按照环境图案的色彩位置信息将主色填充进去,生成数码迷彩,该法适用于固定环境的伪装,对移动目标作用不大。

2)从仿生角度进行迷彩纹理设计。黄炼等^[13]提出可以用仿鳞甲动物皮层和植物叶面组织设计出不规则形状的迷彩,使之更易于融入自然环境,但该方法更侧重于美观性,实用性不强。随着人工智能的发展,ALFIMTSEV A 等^[14]根据现有迷彩样式,通过深度卷积生成对抗网络(deep convolution generative adversarial networks,DCGAN)^[15]生成不同迷彩图案,虽然在计算机模拟战场方面证明了其有效性,但未进行实地验证,实际伪装效果有待评估。

2 迷彩加工方法

数码迷彩在设计完成后到投入使用前还有一个重要的步骤——图案的实现。目前迷彩图案的实现手段主要有平网印花、圆网印花和数码印花。平网印花的网版是尼龙丝网,花型网版漏浆的孔洞

比较小,印到布面上的线条较细,不易产生色浆混合,适合印制比较精细的图案,但印花效率低且成本高。圆网印花网版漏浆的孔洞比较大,印到布面上的线条较粗,比较细小花型部分易渗化到一起,不适合印制云纹图案、数码迷彩等精细的图案。另外,由于圆网印花网版圆周周长一般为 $64\ \text{cm}$,因此印花花回为 $64\ \text{cm}$,或者是 $64\ \text{cm}$ 的倍数。如果花型的花回尺寸设计不是 $64\ \text{cm}$ 的整数倍,花回长度大于圆网周长时,就无法制网;小于圆网周长时,网版上有一部分区域没有花型,印在布面上表现出来是间断式图案,印花效果差。

传统丝网印花只能根据网版的花型进行印花,缺少灵活性,且刻板成本高,不适合印制灵活的数码迷彩图案。数码印花是将花样图案通过数字数码形式输入到计算机,通过计算机印花分色描稿系统(CAD)编辑处理,再由计算机控制微压电式喷墨嘴把专用染液直接喷射到纺织品上形成所需图案的印花方法。数码印花技术打破了传统生产套色和花回长度的限制,适合印制颜色渐变、云纹等高精度图案。而且,设计师可以在计算机上实时修改印花图案,印花过程不再受传统印花刻板的限制,适用于印制多变的数码迷彩图案。但值得注意的是,喷墨印花是 CMYK 混色印花,所有颜色都由 4 色墨水混合而成,墨水性能、打印喷头之间的差异等都会影响混色后颜色的准确性。总之,相较于传统印花,数码印花流程简单且可操作性强,染化料浪费少,产生废水量低,更加绿色环保^[16],是未来迷彩图案制作的主要方式。

3 伪装效果评价

为判断数码迷彩图案能否达到预期的伪装效果,还需要对其伪装效果进行评价。目前,对迷彩伪装效果评价还没有统一的标准。

3.1 主观评价方法

国家军用标准以观察员发现目标的概率进行迷彩效果主观评价^[17],评价等级采用约翰逊判则来判定,分为发现、识别和确认 3 级^[18],评价等级及含义详见表 1。

表 1 约翰逊判则法
Tab. 1 Johnson's rule method

等级	定义
发现	将目标从背景中区分开
识别	识别出目标所属类别(如人员、车辆、装备)
确认	清晰确认目标类型

迷彩图案伪装效果的主观评价方法主要有现场实验法和图像判别法。现场实验法^[19]以发现目标概率对迷彩伪装效果进行评价,实验过程中观察员在指定实验场地、规定距离上对伪装目标进行识别,这种方法对天气、地形及日照角度等环境要求较高,在实际观察过程中比较耗费人力、物力,实施起来不方便且具有主观性。图像判别法将用高空相机等数码摄影装备在野外采集到的目标图片投影在大屏幕上,判别人员佩戴眼动仪^[20]等设备观测迷彩目标,统计其被发现或识别的概率。该法减小了布置场地的难度,提高了迷彩评估效率,但实质上还是以目标的发现概率或识别概率作为评价标准,且容易受环境和观察者自身状态的影响,故判定结果仍然存在一定主观性。

3.2 客观评价方法

近年来,也有学者提出了用人工智能算法检测伪装目标的伪装效果评价方法。张伟等^[21]提出了一种基于注意力机制的迷彩伪装人员检测算法 TC-YOLOv5s,该算法在主干特征提取网络和特征融合网络末端嵌入自注意力 Trans-former 模块,并在特征融合网络中引入卷积注意力机制模块(convolutional block attention module,CBAM),提高了算法对复杂环境下迷彩伪装人员的识别能力。TC-YOLOv5s算法对复杂环境下迷彩伪装人员识别的准确率、召回率以及平均准确率均值分别达到了 95.0%、88.0% 和 95.1%;相比其他同类型算法,TC-YOLOv5s算法更加轻量化,平均准确率均值和处理速度更优。刘珩等^[22]提出基于 DETR 网络进行伪装目标识别的数码迷彩评价算法,该方法与 YOLOv5相比,在精度一致的情况下,分类速度提升了 20%,达到了有效检测的目的。杨迪等^[23]提出了一种使用 Unity 3D 建模模拟真实战场环境,以仿真军用卡车模型为实验对象对伪装目标进行三维评价的方法,但该方法没有考虑大气变化、日照角度等环境条件,模拟伪装环境具有局限性。

国外迷彩伪装领域一直在使用 canny 算子边缘检测伪装目标的识别方法,该方法将含有伪装目标的环境图像进行边缘检测,通过观察伪装目标与环境图像的融合度判别数码迷彩图案的伪装效果。基于人工智能算法的数码迷彩伪装效果评价方法很多,目前还没有统一的标准认定哪一种方法更加有效,在实际评判过程中只能作为辅助方法,最终还需进行现场实验来判定迷彩图案的伪装效果。

4 结 语

文中系统介绍了迷彩伪装的概念及其发展历程,着重探讨了迷彩图案设计、迷彩加工方法和伪装效果评价 3 方面的研究现状。在迷彩图案设计中,通过颜色直方图法、K-means 聚类算法等方式提取主色,探讨了迷彩单元形状与尺寸、迷彩纹理设计对伪装效果的影响。针对迷彩加工方法,比较了传统平网印花、圆网印花和新兴的数码印花技术,强调了数码印花在数码迷彩图案加工中的优越性。最后,对伪装效果的评价方法进行了主观和客观两方面的探讨,介绍了目前基于人工智能算法的数码迷彩伪装效果评价方法。未来数码迷彩可利用数码印花手段及多功能喷墨墨水,实现在纺织服装领域的进一步发展,为现代军事伪装提供更有效的手段。

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] 夏兆鹏,潘佳俊,张海宝,等. 迷彩面料室内加速老化过程及其性能变化[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(5): 198-205.

XIA Zhaopeng, PAN Jiajun, ZHANG Haibao, et al. The indoor accelerated aging process and performance change of camouflage fabrics[J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(5): 198-205. (in Chinese)

[3] 张文琪. 数码迷彩空间混色建模与伪装效果评价[D]. 西安:西安工业大学,2019.

[4] 徐英. 基于背景代表色提取的迷彩伪装颜色选取算法[J]. 光电工程,2007, 34(1):100-103, 144.

XU Ying. Camouflage color selection based on dominant color extraction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(1): 100-103, 144. (in Chinese)

[5] 刘尊洋,王自荣,孙晓泉,等. 基于聚类空间映射的彩色图像主色快速提取方法及系统: 111798526B[P]. 2022-04-19.

[6] 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.

WANG Wenjuan, CUI Peizhang, LI Zhaorui. Vehicle camouflage paint film color selection algorithm based on K-mean[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(1): 54-58. (in Chinese)

- [7] 朱培恺,刘敬浩. 基于改进 K-means 的图片主色提取方法[J]. 南开大学学报(自然科学版),2019,52(6): 12-18.
- ZHU Peikai, LIU Jinghao. Image color extraction algorithm based on improved K-means[J]. Nankai University Journal(Natural Sciences Edition), 2019, 52(6): 12-18. (in Chinese)
- [8] 喻钧,刘飞鸿,王占锋,等. 基于光谱色的迷彩主色提取方法[J]. 兵工自动化,2014,33(1):72-75.
- YU Jun, LIU Feihong, WANG Zhanfeng, et al. Extraction method of dominant colors of pattern painting based on spectrum colors[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(1): 72-75. (in Chinese)
- [9] 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,2008,23(1):21-23,41.
- JIA Qi, LYU Xuliang, LI Lei, et al. Research on the shape and size of cell in pattern painting camouflage using electrochromic materials[J]. Electro-Optic Technology Application, 2008, 23(1): 21-23, 41. (in Chinese)
- [10] 张杰宇,石春琴. 基于视觉分辨率的直升机数码迷彩设计[J]. 中国科技信息,2021(7):26-28,14.
- ZHANG Jieyu, SHI Chunqin. Digital camouflage design of helicopter based on visual resolution[J]. China Science and Technology Information, 2021(7): 26-28, 14. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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.
- LI Chunyan, WANG Zhen, LUO Yi, et al. Background-based contour generation technology in camouflage[J]. Information Recording Materials, 2019, 20(12): 74-75. (in Chinese)
- [13] 黄炼,朱利. 迷彩图案构成的再设计[J]. 现代装饰(理论),2015(11):74.
- HUANG Lian, ZHU Li. Redesign of camouflage pattern composition[J]. Modern Decoration (Theory), 2015 (11): 74. (in Chinese)
- [14] ALFIMTSEV A, SAKULIN S, LOKTEV D, et al. Hostis humani ET mashinae: adversarial camouflage generation[J]. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2019, 11(2): 382-392.
- [15] CONGYING D, ZIHAO D, SHENG L, 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.
- [16] 刘丹,张雨彤,毛志平. 数码喷墨印花设备的发展现状和趋势[J]. 纺织导报,2022(6):38-42.
- LIU Dan, ZHANG Yutong, MAO Zhiping. Application and development of digital inkjet printing machines[J]. China Textile Leader, 2022(6): 38-42. (in Chinese)
- [17] JIE HU, YUAN LU, XING YANG. Research of infrared digital camouflage design and generation[C]//CANGLI LIU. Fifth confrence on frontiers in optical imaging technology and applications. Hefei:SPIE, 2018.
- [18] 刘益民,王家营,刘伟,等. 目标光学伪装效果评价方法分析[J]. 航天电子对抗,2010,26(1):42-44.
- LIU Yimin, WANG Jiaying, LIU Wei, et al. Analysis of methods of detection and evaluation of optical camouflage[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010, 26(1): 42-44. (in Chinese)
- [19] 李园园. 基于曲线融合特性的数码迷彩生成技术研究[D]. 开封:河南大学,2020.
- [20] LIN C J, CHANG C C, LEE Y H. Evaluating camouflage design using eye movement data[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(3): 714-723.
- [21] 张伟,周旗开,李睿智,等. 基于注意力机制的迷彩伪装人员检测算法研究[J]. 医疗卫生装备,2022,43(9): 1-7.
- ZHANG Wei, ZHOU Qikai, LI Ruizhi, et al. Research on camouflage personnel detection algorithm based on attention mechanism[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2022, 43(9): 1-7. (in Chinese)
- [22] 刘珩,冉建国,杨鑫,等. 基于 DETR 的迷彩伪装目标检测[J]. 现代电子技术,2022,45(17):41-46.
- LIU Heng, RAN Jianguo, YANG Xin, et al. Camouflage target detection based on detection transformer[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(17): 41-46. (in Chinese)
- [23] 杨迪,周颖,谢振平. 基于战场环境孪生的迷彩伪装动态效果评估方法[J]. 兵工学报, 2023,45(1):1-14.
- YANG Di, ZHOU Yin, XIE Zhenping. A dynamic effect assessment method of camouflage camouflage based on battlefield environment twinning[J]. Journal of Military Engineering,2023,45(1):1-14.

(责任编辑:张 雪)