

仿生伪装图案遗传进化设计方法研究^{*}

陈善静, 康 青, 王正刚, 蒲 欢, 辛 颖

(后勤工程学院国防建筑规划与环境工程系 重庆 401311)

摘 要:针对传统伪装图案设计方法单一、受主观因素影响较大、伪装效果不够理想等问题,提出了一种仿生伪装图案遗传进化设计方法,根据人眼目视成像侦察和光电成像侦察基本原理构建了目标侦察综合特征参数模型。借鉴生物遗传进化思想,以斑马图案为基础开展伪装图案优选复制、交叉繁殖和变异繁殖等仿生进化处理方法研究,得到能适应成像基本模型的仿生伪装图案,改进了传统伪装图案设计方法。通过多种伪装图案的对比实验表明,本文方法有效地降低了目标的检测识别特征,具有较好的伪装隐蔽效果,综合特征参数较初始时降低 23% 以上,优于其他多种典型伪装方法。该本文方法实现了侦察模型、生物遗传进化思想和伪装原理相关知识交叉融会应用,为迷彩伪装图案的科学化和精细化设计提供了一种新方法。

关键词: 伪装图案;遗传进化;仿生伪装;成像侦察模型;交叉繁殖

中图分类号: E951.4 TH065 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.40

Bionic camouflage pattern design by genetic evolutionary algorithms

Chen Shanjing, Kang Qing, Wang Zhenggang, Pu Huan, Xin Ying

(Department of National Defense Construction Planning and Environment Engineering, Logistical Engineering University,
Chongqing 401311, China)

Abstract: The traditional camouflage pattern design is too single, and mostly depends on the designer's experiences, as a result, the camouflage performance is not satisfied in war field. Thus, a novel bionic camouflage pattern design method by genetic evolutionary algorithm is proposed in this work. The comprehensive parameter model is obtained according to the principle of human visual reconnaissance and photoelectric imaging reconnaissance. The camouflage pattern is processed by fine selection, cross-breeding and variance-breeding based on zebra stripes camouflage pattern. The proposed bionic camouflage pattern can counter imaging reconnaissance to improve the traditional camouflage pattern design. The comparative experiments by several camouflage methods indicate that the proposed method can reduce detection and recognition feature of target superior to the others traditional camouflage patterns. Comprehensive feature parameter is reduced by more than 23% of initial value, which is better than other traditional camouflage patterns. An integrated model of reconnaissance, genetic evolutionary and camouflage theory is achieved in the proposed method, which provides a novel approach for scientific and felicitous camouflage pattern design.

Keywords: camouflage pattern; genetics and evolution; bionic camouflage; model of imaging reconnaissance; cross breeding

1 引 言

迷彩伪装是人员、装备和军事工程最基本的伪装方法,具有操作简便、收效迅速、成本低廉和作用时间长等优点,还能够与其他伪装方法相叠加,增强伪装隐蔽效

果,提高目标战场生存能力。传统迷彩伪装设计主要依靠操作人员的主观经验,迷彩生成效率低,图案斑块由各种平滑曲线组成,边界分明,目标与背景融合不够理想^[1-3]。当前国内外比较流行的数码迷彩伪装将普通迷彩图案转换成细碎的数码方块图案,根据空间混色效应实现目标与背景的融合^[4-5],但是数码迷彩伪装最早由美

国提出,设计思路、作用原理及伪装效果早已为外界熟知,容易被敌方找到相应反伪装识别方法。文献[6]提出了一种基于图案模板回归迭代的数码迷彩设计方法,通过 K 均值聚类提取背景主色调,并利用贪婪算法优化数码斑点图案分布,获得了具有较好光学伪装效果的数码迷彩图案;文献[7]将仿杨树叶、仿枫树叶、仿虎条纹和仿豹实心斑点等 4 种仿生结构元素经斑块化修整后应用到了伪装图案设计中,实现了仿生图案在目标伪装中的初步应用;文献[8]提出了一种结合区域生长与颜色特性的迷彩伪装设计方法,该方法应用均值聚类方法优选出背景主色,然后利用自适应区域生长法对图像目标区域进行分割和颜色填充,最后数学形态学方法进行滤波修正,有效地提高了伪装目标与背景的颜色相似性,取得较好的伪装效果;文献[9]对斑马条纹的视觉伪装作用机理进行了相关研究,并应用虚拟运动探测模型对斑马条纹的运动情况下伪装效果进行了定量分析。整体而言,国内外专家学者对伪装图案设计的研究工作主要侧重于伪装图案作用机理研究,而针对迷彩伪装图案进化或升级改造的相关研究工作却较少,伪装图案应对人眼成像侦察和光电成像侦察的综合能力较差。

伪装技术最早起源于对生物伪装图案的模拟和仿制,而生物的伪装图案是其适应自然环境、经过遗传变异、自然选择、优胜劣汰等进化过程而最终呈现的效果。当前我军迷彩伪装设计应对各种光学侦察设备的针对性不强、图案单一、伪装防护效果不够理想^[10]。针对以上问题,本文根据遗传算法基本原理,以生物伪装图案为基础进行伪装图案的遗传、变异、优选方法研究,得到兼顾人眼和光电成像侦察的仿生伪装图案。

2 侦察系统目标识别特征建模

2.1 人眼成像侦察模型

人眼在观察目标时,对大面积块状区域和颜色特征最为敏感^[11-13],此两部分在光学侦察方面主要反映为对比度特征,人眼能感知目标主要取决于目标与背景的对比度 C 为:

$$C = \frac{L_T - L_B}{\max(L_T, L_B)} \quad (1)$$

式中: L_B 为周围背景亮度, L_T 为目标亮度。同时人眼能从背景中发现目标还与亮点对比阈 ε 有关。当目标对比度为 C 时,其发现概率为:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\left(\frac{C}{\varepsilon} - 1\right) \sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (2)$$

式中: $\sigma = 0.39$, 对于白昼条件下,亮度对比阈 ε 与目标视角及形状有关^[14],具体关系如下:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.325\theta^{-0.819}, & \theta \leq 30' \\ 0.02, & \theta > 30' \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ 为目标对人眼所成的视角。

2.2 光电成像侦察模型

对于光电成像侦察系统,发现和识别目标主要是根据目标亮度 L_T 与背景亮度 L_B 引起的相对差值信号为:

$$\Delta V_i = G_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) \frac{[L_T(\lambda) - L_B(\lambda)] A_i \cos^N(\theta_i)}{4F^2(1 + M_{\text{optics}})^2} \times \tau_{\text{optics}}(\lambda) T_{\text{atm}}(\lambda) d\lambda + D_i \quad (4)$$

式中: G_i 为成像探测器单元 i 响应信号的系统增益, $R_i(\lambda)$ 为探测器单元 i 的响应率, $[\lambda_1, \lambda_2]$ 为光学系统的光谱响应波长范围, θ_i 为探测器单元 i 相对于光学系统中心轴的偏移角, F 为光学系统 F 数, N 为滚降指数 $2 < N < 4$; M_{optics} 为光学系统放大率, $\tau_{\text{optics}}(\lambda)$ 为光学系统的光谱透过率^[15], A_i 为成像探测器单元 i 的几何光敏面积, $T_{\text{atm}}(\lambda)$ 为大气光谱透过率, D_i 为探测器单元 i 的各类噪声元在积分时间内产生的输出电压^[16]。

光电成像侦察结果通常以图像形式显示,侦察图像是依据光电成像系统 A/D 转换器位数进行灰度量化。假设 A/D 转换器为 8 bit,变换的电压信号范围为 $V_{\min} \sim V_{\max}$,其灰度级范围为 $0 \sim 255$,则任意输出电压信号对应的灰度级为:

$$I_i = \frac{255 - 0}{V_{\max} - V_{\min}} \Delta V_i \quad (5)$$

式(4)和(5)构成了光电成像系统信号转换模型,此模型表征了系统对辐射信号到图像信息的转换过程。通过对此信号转换模型进行分析可以看出,图像灰度级 I_i 是目标信息的集中体现,主要表现为目标的亮度信息和形状信息。

2.3 目标侦察综合特征参数提取

通过对人眼成像侦察和光电成像侦察基本模型的分析可知,目标的暴露特征主要为对比度。在远景成像侦察时目标主体的对比度和边缘区域变化是发现和识别目标的重要依据,而在近景成像侦察时目标的对比度特征主要表现为局部的轮廓特征和纹理特征。考虑到不同颜色对人眼的敏感性各不相同,本文将目标侦察所涉及的特征参数归纳为 4 大类,分别是颜色特征、亮度特征、边缘特征和纹理特征。其中,对于颜色特征本文采用目标颜色到背景中心色之间的欧氏距离来表示。

$$T_{\text{color}} = \sum_{x,y \in \Omega_{\text{target}}} \sum_{i \in R,G,B} |I_i(x,y) - \mu_i|^2 \quad (6)$$

式中: $I_i(x,y)$ 为目标区域 Ω_{target} 在 R, G 和 B 3 个分量上的灰度值。 μ_i 为背景 K 均值聚类中心色。

亮度特征以对比度和目标主体检测识别率之和表示。

$$T_{\text{luminance}} = C + \frac{I_{\text{detect}}}{I_{\text{sum}}} \quad (7)$$

式中: C 为对比度, 如式(1)所示, $\frac{I_{\text{detect}}}{I_{\text{sum}}}$ 为目标主体识别率, I_{sum} 为目标区域所占像素总数, I_{detect} 为图像分割后检测识别的目标像素总数。

目标区域边缘特征以边缘像素识别率表示为:

$$T_{\text{edge}} = \frac{E'_{\text{Canny}}}{E_{\text{Canny}}} \quad (8)$$

式中: E_{Canny} 为伪装前目标区域经 Canny 边缘检测算子识别到的边缘像素个数, E'_{Canny} 为伪装后图像经 Canny 边缘检测算子识别到的边缘像素个数^[17-18]。

考虑到纹理特征的方向性, 以图像在 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的灰度共生矩阵为基础, 选择了 4 种典型的二阶统计量来表征纹理特征^[19-21], 分别是灰度共生矩阵的能量 E_T 、信息熵 H_T 、惯性矩 I_T 和相关性 C_T , 其具体计算公式如下:

$$E_T = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij}^2 \quad (9)$$

$$H_T = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} \lg P_{ij} \quad (10)$$

$$I_T = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} |i-j|^2 P_{ij} \quad (11)$$

$$C_T = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(i - \mu_x)(j - \mu_y)P_{ij}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (12)$$

式中: P_{ij} 为灰度共生矩阵, $\mu_x = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} \cdot \mu_y = \sum_{j=0}^{L-1} j \sum_{i=0}^{L-1} P_{ij}$, $\sigma_x = \sum_{i=0}^{L-1} (i - \mu_x)^2 \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij}$ 和 $\sigma_y = \sum_{j=0}^{L-1} (j - \mu_y)^2 \sum_{i=0}^{L-1} P_{ij}$ 。由于各种图案的纹理特征变化较大, 因此本文借鉴式(1)选用纹理特征对比度来衡量目标与背景的纹理特征差异, 因此, 纹理特征最终表示为:

$$T_{\text{texture}} = \frac{T_{\text{目标}} - T_{\text{背景}}}{\max(T_{\text{目标}}, T_{\text{背景}})} \quad (13)$$

式中: T 为分别为目标与背景的能量 E_T 、信息熵 H_T 、惯性矩 I_T 和相关性 C_T 。

根据人眼侦察时 4 类特征的重要性构建特征参数模型:

$$\rho_{\text{eye}} = \eta_{\text{eye1}} T_{\text{color}} + \eta_{\text{eye2}} T_{\text{luminance}} + \eta_{\text{eye3}} T_{\text{edge}} + \eta_{\text{eye4}} T_{\text{texture}} \quad (14)$$

式中: η_{eye1} 、 η_{eye2} 、 η_{eye3} 和 η_{eye4} 为人眼成像侦察时各特征的权重系数。光电成像侦察时的目标特征参数模型为:

$$\rho_{\text{optics}} = \eta_{\text{optics1}} T_{\text{color}} + \eta_{\text{optics2}} T_{\text{luminance}} + \eta_{\text{optics3}} T_{\text{edge}} + \eta_{\text{optics4}} T_{\text{texture}} \quad (15)$$

式中: η_{optics1} 、 η_{optics2} 、 η_{optics3} 和 η_{optics4} 为光电成像侦察时各特征的权重系数。

由于人眼成像侦察和光电成像侦察在现代战场上的

使用频率、作用范围和获取情报价值方面各不相同。因此两种侦察模型在侦察综合评价体系中各自权重也不相同。在目标综合特征参数 ρ_{total} 可以表示为:

$$\rho_{\text{total}} = \omega_{\text{eye}} \rho_{\text{eye}} + \omega_{\text{optics}} \rho_{\text{optics}} \quad (16)$$

式中: $\omega_{\text{eye}} + \omega_{\text{optics}} = 1$ 。目标综合特征参数 ρ_{total} 基本结构如图 1 所示。

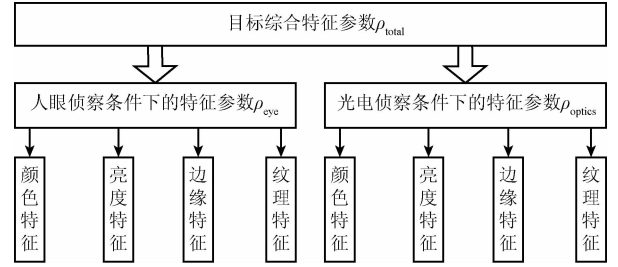


图1 目标综合特征参数基本结构

Fig.1 Basic structure of target's comprehensive feature parameter

3 遗传进化设计方法

遗传算法是科学家借鉴生物界的遗传进化规律而得到的随机优化与搜索方法^[22-23]。本文根据遗传算法基本原理开展伪装图案仿生进化设计方法研究。遗传算法一般包括编码、产生初始群体、计算特征参数、复制、交换和变异等步骤^[24-26]。其中复制概率 P_s 、交换概率 P_c 、变异概率 P_m 选用特定区间的随机数表示: 复制概率 $P_s \in [0.4, 0.5]$, 交换概率 $P_c \in [0.2, 0.3]$, 变异概率 $P_m = 1 - P_s - P_c$ 。

1) 伪装图案编码及综合特征参数计算

对伪装图案编号为 $i = 1, 2, 3, \dots, N$, 作为父代图案 $\{x_k^i, i = 1, 2, 3, \dots, N\}$, 其中, x_k^i 为的长宽分别为 $m \times n$ 的伪装图案, k 为遗传进化代数。初始时父代伪装图案 x_0^i 相同, 每个伪装图案的综合特征参数为 $\rho_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$, 初始时各伪装图案样本对应的权重系数 $w(\hat{x}_k^i)$ 均为 1。对综合特征参数进行归一化为:

$$\rho'_i = \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (17)$$

2) 优选复制

利用多项式重采样方法对归一化父代伪装图案进优选复制, 综合特征参数小的样本会获得较大的概率被选择复制为子代伪装图案, 反之, 则获得较小的概率被选中复制为子代。每次选后, 把被选中的样本移出父代, 剩余样本综合特征参数重新进行归一化, 继续选择, 直到产生的子代图案个数达到复制概率 P_s 。

3) 交叉繁殖

在优选复制以后剩余的 $N - P_s \times N$ 个样本中随机抽取两个父代样本图案进行杂交。设被抽取样本为 i_a, i_b , 其中, i_a, i_b 为优选复制后剩余的样本, 利用一个随机数 $\alpha \in [0.3, 0.4]$ 作为图像交叉融合率, 交叉繁殖公式为:

$$\begin{cases} \tilde{x}_k^{i_a} = \alpha x_k^{i_a} + (1 - \alpha) x_k^{i_b} \\ \tilde{x}_k^{i_b} = \alpha x_k^{i_b} + (1 - \alpha) x_k^{i_a} \end{cases} \quad (18)$$

将新生的 $\tilde{x}_k^{i_a}, \tilde{x}_k^{i_b}$ 作为子代, 如此循环, 直到抽到的杂交子代个数达到 $P_c \times N$ 。

4) 变异繁殖

变异繁殖可以给伪装图案样本集带来新图案样本, 采用马尔可夫链蒙特卡罗移动加高斯白噪声实现并采用快速 MH (Metropolis-Hastings) 算法对样本进行选择, 提高变异样本多样性。在剩余的 $N - P_s \times N$ 个样本中随机抽取 $N - P_s \times N - P_c \times N$ 个样本做变异繁殖。变异后的样本为:

$$\tilde{x}_k^i = A_{k+11k} x_k^i + \delta \quad (19)$$

式中: A_{k+11k} 为一阶马尔可夫链转移矩阵, $\delta \sim N(0, 1)$ 。

通过以上遗传进化得到新生子代伪装图案 $\tilde{x}_k^i, i = 1, 2, \dots, N$ 。新生子代伪装图案综合特征参数由式(16)计算得到。将新生伪装图案样本的综合特征参数转化为新生样本的权值系数为:

$$\begin{aligned} w(\tilde{x}_k^i) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1 - \rho(\tilde{x}_k^i)}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

对新生伪装图案系数归一化为:

$$\tilde{w}(\tilde{x}_k^i) = \frac{w(\tilde{x}_k^i)}{\sum_{i=1}^N w(\tilde{x}_k^i)} \quad (21)$$

以新生子代 $\tilde{x}_k^i$ 作为下一代遗传进化的父代伪装图案, 即 $x_{k+1}^i = \tilde{x}_k^i$, 继续进行优选、交叉和变异等循环进化处理。当进化代数大于等于遗传进化代数截至门限 T_{end_k} 或连续 4 代样本其最小综合特征参数变化和小于等于综合特征参数截至门限 T_{end_ρ} 时遗传进化循环停止, 输出最优伪装图案。

$$\begin{cases} k \geq T_{\text{end}_k} \\ \sum_{l=0}^3 |\rho_{i-l} - \rho_{i-l-1}| \leq T_{\text{end}_\rho} \end{cases} \quad (22)$$

4 实验结果与分析

为了验证本文提出的基于遗传进化原理的伪装图案设计方法, 利用 MATLAB 编程实现了相关算法, 并利用某指挥防护工程模型房航拍图像和前苏联废弃洞库口部图像分别进行了两组伪装图案设计对比实验。

4.1 某指挥防护工程模型房伪装设计

本组实验所用到的半埋式指挥防护工程模型房位于后勤工程学院东区伪装训练场, 该训练场由工程洞库、接近路、模型房、操场场坪及配套设施组成, 如图 2 所示。此模型房由我院承担的国家 836 项目资助修建。防护与伪装设计是指挥防护工程所必须考虑的重要内容, 因此本文以指挥防护工程模型房为基础开展伪装图案的设计实验。



图 2 伪装训练场整体图像

Fig. 2 The overall layout of camouflage training ground

指挥防护工程模型房航拍图像和正面图像如图 3 和 4 所示。所使用的航拍器材为大疆 inspire 1 无人机, 如图 5 所示, 相机型号: X3/FC350, 航拍高度 70 m。在伪装设计对比实验中主要针对航空拍照侦察, 因此本文以模型房屋顶为研究对象, 选取的模型房主体区域和边缘区域如图 6 所示。所使用的仿生伪装条纹为斑马纹, 如图 7 所示。



图 3 指挥防护工程模型房航拍图像

Fig. 3 Aerial map of simulating room for command protection engineering

在遗传算法中, 总样本数量 $N = 50$, 循环进化代数为 180 代 ($T_{\text{end}_k} = 180, T_{\text{end}_\rho} = 10^{-5}$)。由于人眼的作用距离和分辨能力有限, 边缘和纹理等细节特征作用较小,



图 4 指挥防护工程模型房正面图像

Fig. 4 Elevation drawing simulating room for command protection engineering



图 5 大疆 inspire 1 无人机

Fig. 5 UAV of Dajiang inspire 1



图 6 模型房主体区域和边缘区域分布

Fig. 6 Distribution of main area and edge for simulating room

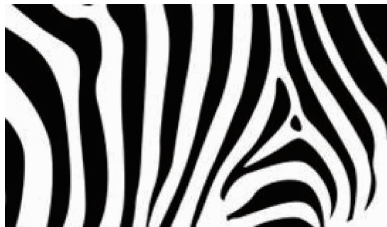


图 7 斑马纹分布情况

Fig. 7 Distribution of zebra stripe

发现和识别目标主要依靠颜色特征和亮度特征,因此,人眼成像的各特征权重系数分别设为 $\eta_{eye1} = 0.4, \eta_{eye2} = 0.4, \eta_{eye3} = 0.1$ 和 $\eta_{eye4} = 0.1$ 。光电成像侦察时可以通过相机焦距调整及图像处理手段综合分析目标的颜色、

亮度、边缘和纹理 4 类特征,因此光电成像的各特征权重系数相同,即 $\eta_{optics1} = 0.25, \eta_{optics2} = 0.25, \eta_{optics3} = 0.25$ 和 $\eta_{optics4} = 0.25$ 。考虑到人眼成像侦察和光电成像侦察在战场上的实际使用效果和作用范围,目标综合特征参数各权重分别设为 $\omega_{eye} = 0.3, \omega_{optics} = 0.7$ 。

本文应用遗传算法对伪装图案进行 180 代遗传进化,获得归一化后综合特征参数变化曲线如图 8 所示,遗传算法的起始代为斑马条纹的直接映射图案,如图 9 所示。结合图 8~10 可知,起始代伪装图案经过遗传进化后,综合特征参数开始逐步降低,伪装图案变得斑驳,目标图案纹理分布与背景趋于融合。当遗传进化结束后,输出综合特征参数最小的伪装图案,即为本文最终提取的遗传进化仿生伪装图案(第 30 代进化图案),如图 10 所示。

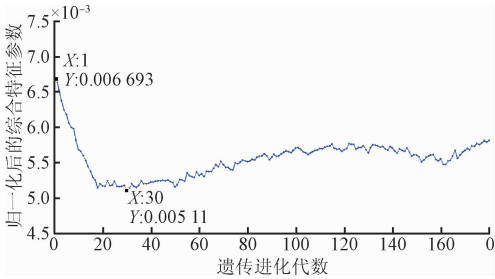


图 8 模型房综合特征参数变化曲线

Fig. 8 Curve of comprehensive feature parameter for simulating room



图 9 模型房直接映射的斑马纹伪装图案(起始代, 条纹与底色 RGB 三分量分别为[95,128,88]、[210,179,174])

Fig. 9 Camouflage pattern which is mapped by zebra stripe for simulating room (The first generation, three RGB components of stripe and background are [95,128,88], [210,179,174])



图 10 模型房遗传进化仿生伪装图案(第 30 代, 条纹与底色 RGB 三分量分别为:[95,128,88]、[210,179,174])

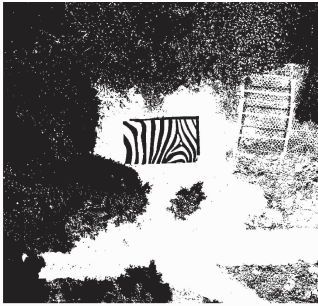
Fig. 10 Bionic camouflage pattern by genetic evolutionary algorithms for simulating room (The thirty, three RGB components of stripe and background are [95,128,88], [210,179,174])

为了对本文遗传进化仿生伪装图案的伪装效果进行量化评估,将原始图像(未伪装)、直接映射斑马条纹的伪装图案和本文遗传进化仿生伪装图案,以及文献[7]

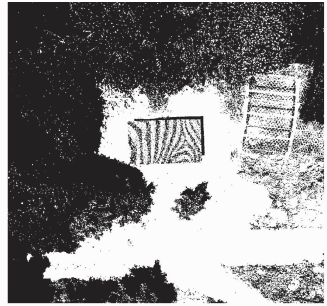
中的仿生伪装方法和文献[8]中结合区域生长和颜色特征的伪装图案设计方法进行了对比。图 11 所示为原始图像和斑马纹伪装图案经过目标分割识别和边缘检测的效果图。图 12 和 13 所示为文献[7-8]方法的伪装效果图及检测识别结果图。5 种图案的亮度特征、边缘特征和纹理特征相关参数如表 1 所示。结合以上图表可以看出,直接映射斑马条纹的伪装图案其效果并不理想,部分纹理特征参数反而变得更高,不利于目标隐蔽伪装。文献[7]提出的仿生伪装方法将杨树叶图案应用到目标伪装中,通过仿杨树叶图案弱化了目标主体特别特征和边缘特征,但纹理特征对比度反而有一定增加,仍然是目标暴露的重要征候。文献[8]提出的结合区域生长和颜色特征的伪装方法在目标主体隐蔽方面效果并不理想,但目标主体识别率较高(见图 13(b)和表 1),目标主体颜色比较单一,缺少与背景相适应的斑驳感,纹理特征和背景纹理存在差别较大,容易造成目标暴露。本文方法将仿生图案进行遗传进化处理,使图像边缘和轮廓特征得到弱化,多种纹理特征与背景的对比差异均有所降低。虽然目标的对比度和主体识别率有所上升,但目标整体色调与周围土壤背景融合较好,目标与背景的纹理的整体分布趋于相近,综合特征参数较初始值降低 23.65%,有效地提高了模型房的伪装效果。



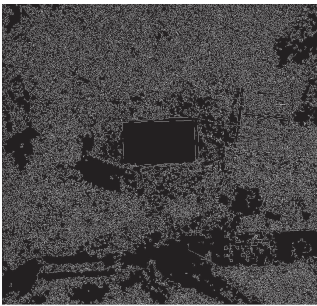
(a) 原始图像目标主体检测结果
(a) Result of main areaidentification for original picture



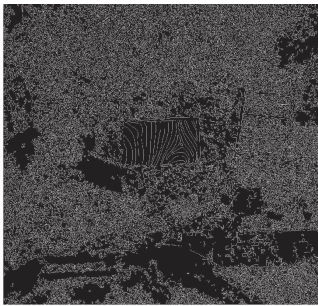
(b) 斑马图案直接映射后目标主体检测结果
(b) Result of main areaidentification for camouflage pattern which is mapped by zebra stripe



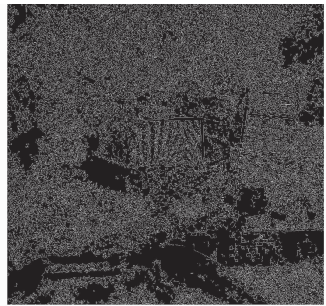
(c) 本文遗传进化设计后的目标主体检测结果
(c) Result of main areaidentification for the proposed camouflage pattern by genetic evolutionary algorithms



(d) 原始图像边缘检测结果
(d) Result of edge detection for original picture



(e) 斑马图案直接映射后边缘检测结果
(e) Result of edge detection for camouflage pattern which is mapped by zebra stripe



(f) 本文遗传进化设计后的边缘检测结果
(f) Result of edge detection for the proposed camouflage pattern by genetic evolutionary algorithms

图 11 模型房识别和边缘检测的结果对比图

Fig. 11 Comparative picture of simulating room on target identification and edge detection

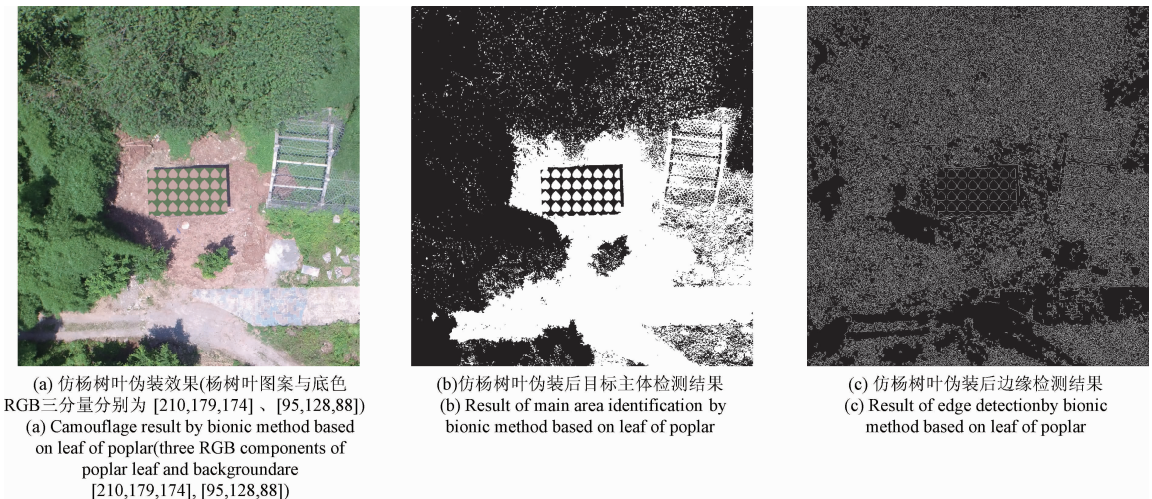


图 12 模型房仿杨树叶伪装效果及目标识别和边缘检测结果(文献[7]方法)

Fig. 12 Camouflage result, target identification and edge detection of simulating room by bionic method based on leaf of poplar(the method proposed by Ref. [7])

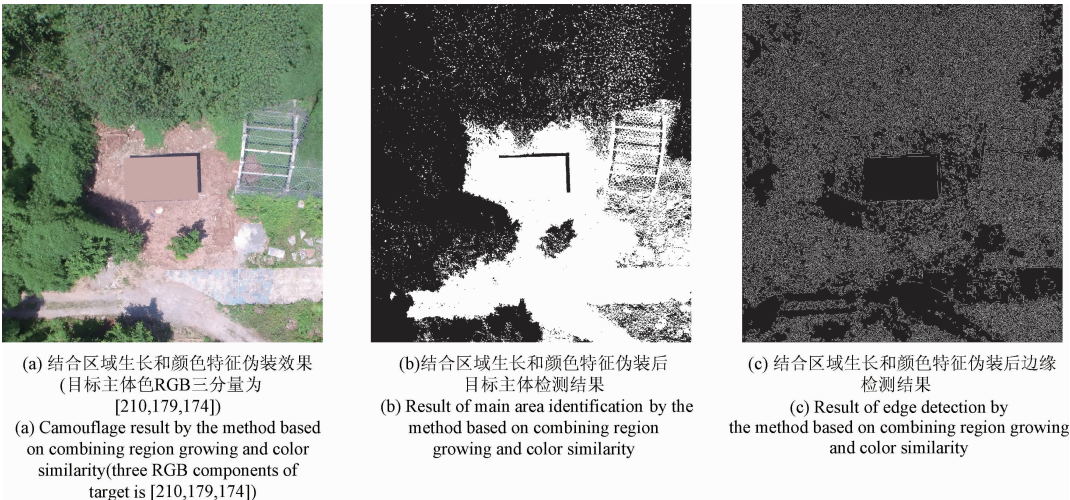


图 13 模型房结合区域生长和颜色特征伪装效果及目标识别和边缘检测结果(文献[8]方法)

Fig. 13 Camouflage result, target identification and edge detection of simulating room by the method based on combining region growing and color similarity (the method proposed by Ref. [8])

表 1 模型房 4 种伪装图案亮度特征、边缘特征和纹理特征对比表

Table 1 Comparative table of four camouflage patterns for simulating room on brightness feature, edge feature and texture feature

方法	原始图像	仿杨树叶伪装 图像(文献[7]方法)	结合区域生长和颜色特征 的伪装图像(文献[8]方法)	斑马图案直接映射后 伪装图像	遗传进化方法 获得的伪装图像
对比度	0.935 4	0.168 4	0.422 9	0.154 5	0.206 1
目标主体识别率/%	100	55.32	100	52.29	59.66
边缘特征识别率%	25.27	14.02	17.81	18.77	11.96
能量对比度	4.117 2	7.142 7	12.808 7	5.837 4	4.051 9
信息熵对比度	0.795 6	0.889 2	0.862 5	0.811 6	0.542 6
惯性矩对比度	6.735 6	12.853 3	6.994 6	6.370 0	5.589 4
相关性对比度	0.177 4	0.305 4	0.227 4	0.078 5	0.075 6

4.2 洞库口部图像伪装设计

本组实验利用前苏联废弃洞库口部图像(见图 14)进行伪装图案设计对比实验。目标洞库主体区域和边缘部分如图 15 所示,所使用的仿生伪装条纹为斑马纹,如图 7 所示。在遗传算法中,总样本数量 $N = 50$,循环进化代数数为 80 代($T_{\text{end}_k} = 80, T_{\text{end}_p} = 10^{-5}$)。各特征参数及权重系数与实验一相同。遗传算法对伪装图案进行 80 代遗传进化,获得归一化后综合特征参数变化曲线如图 16 所示,遗传算法的起始代为斑马条纹的直接映射图案,如图 17 所示。仿生伪装图案经过本文遗传进化处理后目标对比度、边缘特征和主体识别特征逐步弱化,纹理分布与背景趋于相似,综合特征参数随遗传迭代次数呈先减小再增加变化。当遗传进化到第 64 代时,伪装图案的综合特征参数达到极小值点,得到具有最优伪装效果的遗传进化仿生伪装图案,如图 18 所示。



图 14 前苏联废弃洞库口部

Fig. 14 Cavern entrance of The Soviet Union



图 15 洞库口部边缘区域与目标区域分布

Fig. 15 Distribution of edge and target for cavern entrance

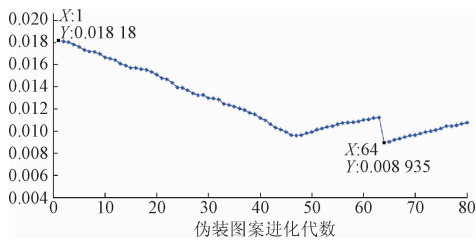


图 16 洞库口部综合特征参数变化曲线

Fig. 16 Curve of comprehensive feature parameter for cavern entrance



图 17 洞库口部直接映射的斑马纹伪装图案(起始代, 条纹与底色 RGB 三分量分别为[113,116,69]、[168,158,154])

Fig. 17 Camouflage pattern which is mapping by zebra stripe for cavern entrance (the first generation, three RGB components of stripe and background are [113,116,69], [168,158,154])



图 18 洞库口部遗传进化仿生伪装图案(第 64 代, 条纹与底色 RGB 三分量分别为[113,116,69]、[168,158,154])

Fig. 18 Bionic camouflage pattern by genetic evolutionary algorithms for cavern entrance (The sixty-fourth, three RGB components of stripe and background are [113,116,69], [168,158,154])

将原始图像(未伪装)、直接映射斑马条纹的伪装图案和本文遗传进化仿生伪装图案,以及文献[7]方法和文献[8]方法进行了量化对比评估。图 19 所示为原始图像和斑马纹伪装图案经过目标分割识别和边缘检测的效果图。图 20 和 21 为文献[7-8]方法的伪装效果图及检测识别结果图。5 种图案的亮度特征、边缘特征和纹理特征相关参数如表 2 所示。结合以上图表可以看出,直接映射斑马条纹的伪装图案其效果并不理想,其中目标对比度、边缘识别率和纹理特征部分参数反而变较高,不利于目标隐蔽伪装。文献[7]提出的仿生伪装方法将杨树树叶图案应用到目标伪装中,通过仿杨树树叶图案弱化了目标主体特别特征,但边缘特征和纹理特征降低不明显,仍然是目标暴露的重要征候。文献[8]提出的结合区域生长和颜色特征的伪装方法在目标主体隐蔽方面效果比较好,主体识别率较低(见图 21(b)和表 2),但目标主体颜色比较单一,纹理特征和背景纹理存在差别较大,容易造成目标暴露。本文方法将仿生图案进行遗传进化处理,使图像边缘、轮廓和目标主体区域的特征均被弱化,多种纹理特征与背景的对比差异均有所降低。目标与背景处于混杂融合

中,但斑点和纹理的整体分布趋势与背景的树木、森林的生长方向大致相同,综合特征参数较初始值降低 50.85% ,有效地提高了洞库口部的隐蔽效果。由此可见,本文提出的仿生伪装图案遗传进化方法设计的伪装图案确实达到了增强目标伪装效果,降低目标发现识别概率,提高目标的战场生存能力的目的。

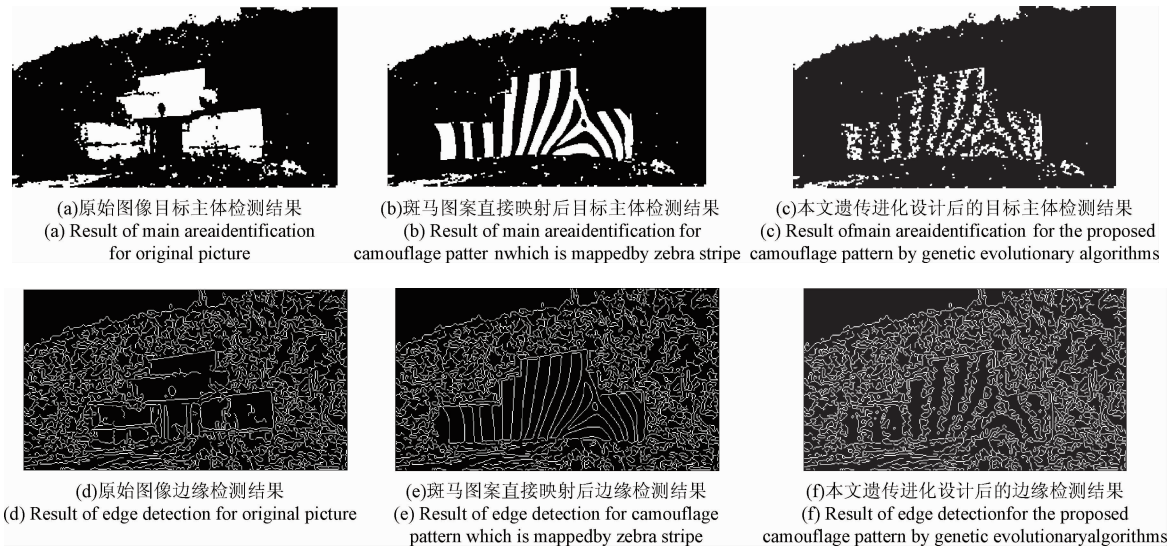


图 19 洞库口部目标识别和边缘检测的结果对比

Fig. 19 Comparative picture of cavern entrance on target identification and edge detection

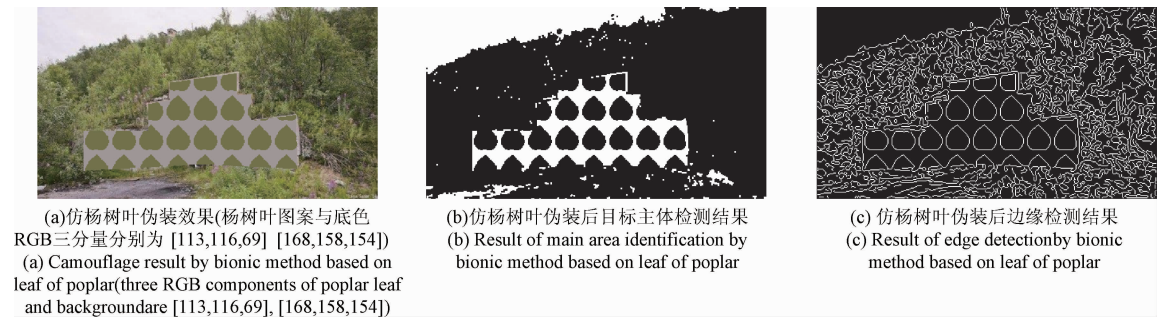


图 20 洞库口部仿杨树树叶伪装效果及目标识别和边缘检测结果(文献[7]方法)

Fig. 20 Camouflage result, target identification and edge detection of cavern entrance by bionic method based on leaf of poplar(the method proposed by reference[7])

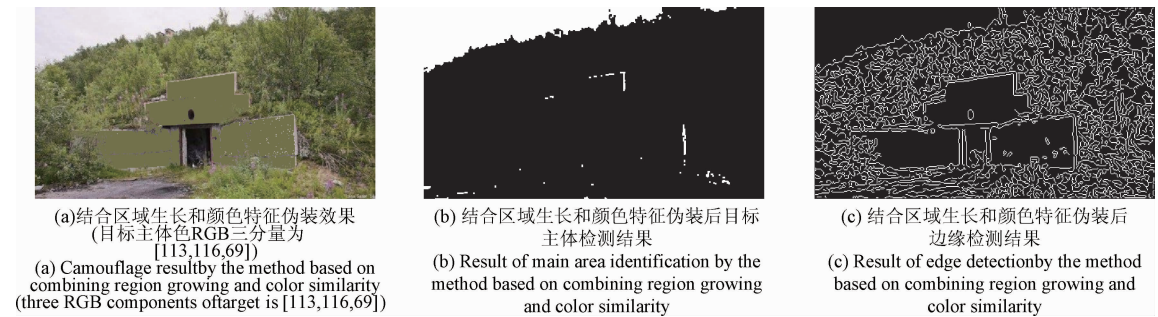


图 21 洞库口部结合区域生长和颜色特征伪装效果及目标识别和边缘检测结果(文献[8]方法)

Fig. 21 Camouflage result, target identification and edge detection of cavern entrance by the method based on combining region growing and color similarity (the method proposed by Ref. [8])

表 2 洞库口部四种伪装图案亮度特征、边缘特征和纹理特征对比表

Table 2 Comparative table of four camouflage patterns for cavern entrance on brightness feature, edge feature and texture feature

	原始图像	仿杨树叶伪装 图像(文献[7]方法)	结合区域生长和颜色 特征的伪装图像(文献[8]方法)	斑马图案直接映 射后伪装图像	遗传进化方法 获得的伪装图像
对比度	0.128 6	0.061	0.154 8	0.804	0.018 0
目标主体识别率/%	63.89	45.3	3.8122×10^{-2}	50.13	27.27
边缘特征识别率/%	21.08	21.9	22.86	22.05	18.56
能量对比度	7.675 7	7.897	8.789 8	4.559 4	3.426 6
信息熵对比度	0.870 4	0.931 2	0.696 4	0.717 6	0.670 4
惯性矩对比度	7.057 3	5.579	5.285 9	2.680 4	1.408 5
相关性对比度	0.901 1	0.961 4	0.950 9	1.059 0	0.415 4

5 结论与展望

迷彩伪装是军事目标最常用、最基本的一种光学伪装方法,对增强目标战场生存能力有着重要意义。本文针对传统迷彩伪装图案设计方法单一,受主观因素影响较大,伪装防护效果不够理想等问题,从人眼目视成像侦察和光电成像侦察基本原理出发,构建了目标侦察综合特征参数模型,借鉴生物遗传进化基本机理,利用遗传算法对伪装图案进行优选复制、交叉繁殖和变异繁殖等仿生进化处理,改进了传统伪装图案设计方法,并利用某指挥防护工程模型房和洞库口部图像进行了多种伪装方法的对比实验。实验结果表明,本文方法获得的遗传进化仿生伪装图案其综合特征参数较初始情况降低 23% 以上,颜色特征、亮度特征、边缘特征和纹理特征都优于其他多种典型伪装方法,可有效提高了目标伪装效果。

伪装图案设计对提升目标伪装效果有着重要的影响。为了适应当前海量侦察图像数据,多种高级智能机器识别算法在侦察情报处理方面正逐步得到应用。例如,基于支持向量机、神经网络或人工免疫网络的目标识别系统已经初步具备了伪装目标自动检测与识别能力。为了应对这些高级智能机器识别算法,迷彩伪装图案设计与应用必须进行相应的改进和优化。由于本人时间、精力和能力有限,应对多种智能机器识别算法的迷彩伪装图案设计方法正在下一步的研究工作之中。通过将伪装技术、生物遗传进化原理和计算机图像处理技术相结合,提升迷彩伪装效果,有效应对多种智能机器识别算法。

参考文献

[1] 王展, 颜云辉, 焦学勇. 基于灰色理论的迷彩伪装多指标综合评价[J]. 兵工学报, 2013, 34 (10): 1250-1257.
WANG ZH, YAN Y H, JIAO X Y. Multi-index comprehensive evaluation of camouflage based on gray theory [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34 (10): 1250-1257.

[2] 催长彬, 康青, 夏雪, 等. 遮障后洞库口部的水雾红外伪装性能分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42 (增刊 1): 1-6.
CUI CH B, KANG Q, XIA X, et al. Analysis on IR camouflage performance of water fog of cavern mouth after screen camouflage[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (Suppl. 1): 1-6.

[3] ZHANG X, ZHU C, WANG SH, et al. A Bayesian approach for camouflaged moving object detection[C]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016: 1-11.

[4] SCHWARZ A. Adaptive camouflage in the VIS and IR spectral range: Main principles and mechanisms[C]. SPIE Proceedings of Target and Background Signatures, 2015: 9653061-9653069.

[5] ZHANG Y, XUE SH Q, JIANG X J, et al. The spatial color mixing model of digital camouflage pattern[J]. Defence Technology, 2013, 9 (7): 157-161.

[6] XUE F, XU SH, LUO Y T et al. Design of digital camouflage by recursive overlapping of pattern templates[J]. Neurocomputing, 2016, 172 (12): 262-270.

[7] 张勇, 吴文健, 刘志明. 仿生迷彩伪装设计[J]. 计算机工程, 2009, 35 (6): 35-37.
ZHANG Y, WU W J, LIU ZH M. Design of bionic camouflage pattern[J]. Computer Engineering, 2009, 35 (6): 35-37.

[8] 陈香玲, 杨恒伏, 刘聪华, 等. 结合区域生长与颜色特性的迷彩伪装设计[J]. 电讯技术, 2015, 55 (4): 453-457.
CHEN X L, YANG H F, LIU C H, et al. Camouflage design by combining region growing and color similarity[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55 (4): 453-457.

[9] MARTIN J H, JOHANNES M Z. Motion camouflage induced by zebra stripes[J]. Zoology, 2014, 117 (10):

- 163-170.
- [10] YU J Q, CAO ZH, LAI Q P. The optimal camouflage pattern assessment and design in all conditions [J]. Journal of Materials Science Research, 2015, 4 (3): 76-94.
- [11] LIN C J, CHANG C C, LEE Y H. Evaluating camouflage design using eye movement data[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(3): 714-723.
- [12] NEIDER M B, ZELINSKY G J. Searching for camouflaged targets: Effects of target-background similarity on visual search[J]. Vision Research, 2006, 46(1): 2217-2235.
- [13] 闫钧华, 朱可, 张婉怡, 等. 基于显著性图像边缘的全参考图像质量评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2140-2148.
- YAN J H, ZHU K, ZHANG W Y, et al. Full reference image quality assessment based on the edge of saliency image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2140-2148.
- [14] 康青, 周泽平. 军事工程伪装技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 22-35.
- KANG Q, ZHOU Z P. Camouflage technology for martial engineering[M]. Beijing: Defense Press, 2004: 22-35.
- [15] OZDEMIR T, SAGLAM A, OZDEMIR F B, et al. The evaluation of spectral transmittance of optical eyeglasses[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(4): 2062-2068.
- [16] 张建奇. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 42-58.
- ZHANG J Q. Modeling of photo-electricity image system and theory of performance assessment [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010: 42-58.
- [17] CHIAO C C, KIMBERLY M U, LIESE A, et al. How visual edge features influence cuttlefish camouflage patterning[J]. Vision Research, 2013, 83(3): 40-47.
- [18] PRASED L, SINGH H, GALLAGER S. Edge-based cuing for detection of benthic camouflage[J]. Methods in Oceanography, 2016, 15(4): 35-48.
- [19] XU B CH, WANG X F, ZHOU X R, et al. Source camera identification from image texture features [J]. Neurocomputing, 2016, 207(5): 131-140.
- [20] WALEED A S, WALEED A N, MARELLI M, et al. Visual texture for automated characterisation of geological features in borehole televiewer imagery [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 119(8): 139-146.
- [21] SINGH S K, DHAWALE C A, MISRA S. Survey of object detection methods in camouflaged image [C]. International Conference on Electronic Engineering and Computer Science, 2013: 351-357.
- [22] 陈善静, 杨华, 曾凯, 等. 基于遗传算法的粒子滤波跟踪算法[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 16-23.
- CHEN SH J, YANG H, ZENG K, et al. Particle filter tracking algorithm based on genetic algorithm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(10): 16-23.
- [23] 刘浩然, 赵翠香, 李轩, 等. 一种基于改进遗传算法的神经网络优化算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1573-1580.
- LIU H R, ZHAO C X, LI X, et al. Study on a neural network optimization algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1573-1580.
- [24] LIU M F, LIU Y, HU H J, et al. Genetic algorithm and mathematical morphology based binarization method for strip steel defect image with non-uniform illumination[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 37(5): 70-77.
- [25] HU H J, LIU Y, LIU M F, et al. Surface defect classification in large-scale strip steel image collection via hybrid chromosome genetic algorithm [J]. Neurocomputing, 2016, 181(3): 86-95.
- [26] 冯霞, 郝慧敏. 基于遗传算法的 IMX 系统测试数据自动生成研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2501-2507.
- FENG X, HAO H M. Research on automatic generation of test data in IMX based on genetic algorithms [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(10): 2501-2507.

作者简介



陈善静 (通讯作者), 分别在 2008 年、2011 年和 2014 年于电子工程学院获得学士、硕士学位和博士学位, 现为后勤工程学院讲师, 主要研究方向为信号与信息处理、军事工程伪装理论与技术。

E-mail: chengshanjing_11@163.com

Chen Shan-jing (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph.D. degree all from Electronic Engineering Institute, Logistical Engineering University in 2008, 2011, and 2014, respectively. Currently, he is a lecturer in Logistical Engineering University. His main research interests include signal and information processing, camouflage theory and technology for military engineering.



康青, 分别在 1991 年和 1994 年于西安交通大学获得学士学位和硕士学位, 现为后勤工程学院教授, 主要研究方向为军事工程伪装理论与技术。

E-mail: kangqing_69@163.com

Kang Qing received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xian Jiao Tong University in 1991 and 1994, respectively. Now he is professor in Logistical Engineering University. His main research interest is camouflage theory and technology for military engineering.