

二值条纹投影伪装物体检测技术

王飞¹, 蔡家旭¹, 潘艳娟¹, 奚冬冬¹, 王玉伟^{1,2}, 刘路^{1,2*}¹安徽农业大学工学院, 安徽 合肥 230036;²安徽省智能农机装备工程实验室, 安徽 合肥 230036

摘要 伪装物体检测技术在农业治理、野外搜救和军事探测等领域中起着重要的作用。但由于这项技术大多需要复杂的运算模型和大量的数据实验,不利于实现高速在线检测。本文提出一种二值条纹投影伪装物体检测方法,将三幅二值条纹图像分别投影至检测区域和伪装物体入侵区域的表面并求取其边缘图像,经掩模提取算法消除背景阴影和膨胀运算消除错位条纹后,最终获得伪装物体的完整真实信息。仿真和真实实验结果均表明,二值条纹投影伪装物体检测技术可实现在多种复杂环境中快速且准确地获取伪装物体的位置、外缘轮廓等真实信息,验证了所提方法的有效性。

关键词 测量; 伪装检测; 条纹投影; 二值条纹; 边缘检测

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1612005

Camouflage Object Detection Technology with Binary Fringe Projection

Wang Fei¹, Cai Jiayu¹, Pan Yanjuan¹, Xi Dongdong¹, Wang Yuwei^{1,2}, Liu Lu^{1,2*}¹School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;²Anhui Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei, Anhui 230036, China

Abstract The detection technology for camouflage objects plays an important role in agricultural management, field search and rescue, military detection, and other fields. However, this technology usually requires complex operational models and massive data experiments, which is not conducive to high-speed online detection. In this paper, a detection method for camouflage objects with binary fringe projection is proposed. Three binary fringe images are projected onto the surface of the detection area and the camouflage object intrusion area, respectively, and the edge image is acquired. After the background shadow is eliminated by the mask extraction algorithm and the misplaced fringe is eliminated by the dilation operation, the complete real information of the camouflage object is finally obtained. The simulation and experimental results show that the proposed technology can quickly and accurately attain the real information about the position and contour of camouflage objects in complex environments, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words measurement; camouflage detection; fringe projection; binary fringe; edge detection

OCIS codes 120.4630; 110.2970; 150.0155; 100.2650

1 引言

伪装是一种隐真示假的行为,包括天然伪装和人工伪装^[1]。天然伪装是利用地形、地物、黑夜和能见度不高的天气条件或自身的形态、纹理和着色等

天然环境因素达到防御意图或躲避天敌。自然界中许多生物例如螃蟹、变色龙、猫头鹰、叶蝗虫等,利用色彩与纹理特征将身体隐藏到周围环境中。人工伪装是人类通过掩蔽人工纹理或着色等方法对目标进行隐蔽性伪装,广泛地应用于军事领域。例如士兵

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-04-05; 录用日期: 2021-04-09

基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085QF318)、安徽省重点研发与开发计划(202004h07020009)

通信作者: *vliulu@ahau.edu.cn

的迷彩服、伪装的炮楼、特殊色彩的战机等,均利用了物理、生物及化学领域的技术手段,以改变伪装物体自身的特征信息,降低该物体的可探测特征,实现对伪装物体的“隐真”;或者模拟物体的可探测性特征,仿造成相似物体以“示假”^[2]。因此,伪装物体检测技术在生物科学、野外救援、军事安全等领域中具有巨大的应用潜力,同时也面临很大的挑战。

传统的伪装物体检测方法主要通过分析颜色、形状、亮度、纹理等特征来评估,泛化能力较差。近年来,深度学习在伪装物体检测方面取得了不错的效果。Le 等^[3]提供了一种新的伪装物体图像数据集作为基准,采用高效灵活的端到端合成分支深度网络用于实现伪装物体分割。Zheng 等^[4]在构建数据集包含多种自然场景中的伪装物体基础上,提出一种密集的反卷积网络,有效融合多尺度高层语义特征,并成功标记出伪装物体。Rao 等^[5]在伪装目标纹理平滑的条件下建立伪装图像表征实际纹理和统计模型,实现了识别伪装图像中一个或多个目标对象,但不利于在复杂环境中完整地提取伪装目标。总的来说,上述方法均能实现对伪装物体的检测,但往往需要复杂的运算模型和大量的数据实验,具有一定的局限性。类似地,Deng 等^[6]将条纹投影技术应用于伪装物体的检测,具有成本低、精度高、鲁棒性好等优点,但该方法需要投射六幅灰度条纹图像,不利于高速在线检测。

本文利用二值条纹投影具有处理速度快、对比度高等优点,提出一种二值条纹投影伪装物体检测的技术。首先将三幅正交结构网格格式二值条纹分别投影至检测区域和伪装物体表面,然后分别采集并提取其边缘图像,依据互补二值条纹的差异特征和对比条纹边缘消除背景阴影信息和条纹错位现象,最后将检测区域和伪装物体的边缘图相减获取伪装物体的真实信息。仿真实验和真实实验结果均表明,二值条纹投影伪装物体检测技术成功实现了较为准确的快速伪装检测。

2 基本原理

2.1 二值条纹投影伪装物体检测系统

二值条纹投影伪装物体检测系统由投影仪(DLP Light-Crafter 4500)、相机(Basler a2A 1920-160ucBAS)和计算机组成。所用相机的分辨率为 1920 pixel×1200 pixel,镜头的焦距为 8 mm,投影仪的分辨率为 912 pixel×1140 pixel,相机光轴与投影仪光轴夹角约 30°。投影仪将二值条纹图像投射

至伪装检测区域,相机实时触发采集检测区域经调制后的图像,并上传至计算机进行条纹分析^[7-10]。投影仪、相机与伪装检测区域三者之间构成三角测量关系,如图 1 所示。其中, P 为投影仪光心, C 为相机光心, O 为相机光轴和投影仪光轴的交点。根据结构几何关系推导出的高度 Z 的数学表达式为

$$Z(x, y) = \frac{d \cdot H_1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + d^2}} \cdot \frac{\overline{AB}}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + d^2} + \overline{AB}}, \quad (1)$$

式中: $Z(x, y)$ 表示伪装物体高度; H_1 和 H_2 分别为相机光心和投影仪光心到参考水平面的距离; d 表示相机光心与投影仪光心的水平距离; \overline{AB} 表示投影仪和相机经过交点 Q 在伪装检测区域平面上投影的距离。

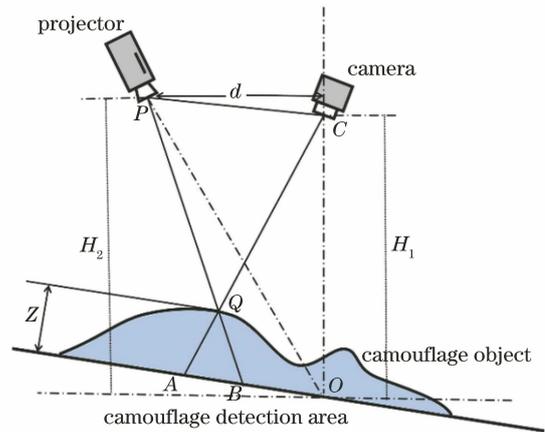


图 1 三角测量结构图

Fig. 1 Triangulation structure diagram

由于在实际测量中, \overline{AB} 远小于 $\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + d^2}$,因此(1)式可简化为

$$Z(x, y) = \frac{d \cdot H_1}{(H_2 - H_1)^2 + d^2} \cdot \overline{AB}. \quad (2)$$

二值条纹投影技术具有非接触、成本低、处理速度快、条纹对比度强等优点,可实现在线投影^[11-14]。计算机生成三幅正交结构网格格式二值条纹,旨在增强识别的分辨率,经投影仪投射至无伪装物体侵入的检测区域。三幅正交结构网格格式二值条纹的强度分布可描述为

$$P_0(x^p, y^p) = \text{mod}(x^p, T) > T/2, \quad (3)$$

$$P_1(x^p, y^p) = \text{mod}(x^p, T) \leq T/2, \quad (4)$$

$$P_2(x^p, y^p) = \text{mod}(y^p, T) \leq T/2, \quad (5)$$

式中: (x^p, y^p) 表示投影仪的像素坐标; $P_0(x^p, y^p)$ 、 $P_1(x^p, y^p)$ 、 $P_2(x^p, y^p)$ 表示三幅二值条纹强度;

mod 表示取余运算; T 表示水平、竖直方向上的条纹周期。其中, $P_0(x^p, y^p)$ 和 $P_1(x^p, y^p)$ 存在如下

互补关系:

$$P_0(x^p, y^p) + P_1(x^p, y^p) = 1. \quad (6)$$

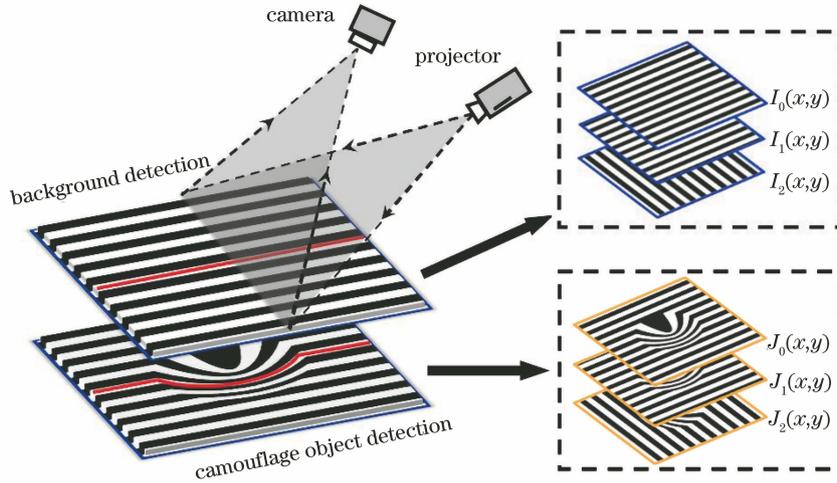


图 2 二值条纹投影-采集过程

Fig. 2 Binary fringe projection-acquisition process

如图 2 所示, 投影仪投射条纹至检测背景区域, 相机采集到条纹图像数学表达式为^[15]

$$I(x, y) = \alpha(x, y) \{ a + b \cdot \cos[\phi(x, y)] + \beta_1(x, y) \} + \beta_2(x, y), \quad (7)$$

式中: (x, y) 表示相机的像素坐标; a 和 b 表示两个常数, 且 $a = b = 0.5$; $\alpha(x, y)$ 表示被测物体的表面反射率; $\phi(x, y)$ 表示与被测物体相关的包裹相位; $\beta_1(x, y)$ 和 $\beta_2(x, y)$ 分别表示环境光和额外的环境光。其中, $\alpha(x, y)[a + \beta_1(x, y)] + \beta_2(x, y)$ 称为条纹图像和背景照度相关的平均光强, $\alpha(x, y)b$ 称为条纹图像对比度和表面反射率相关的调制强度的幅值。故二值条纹投影-采集过程中, 三幅采集的正交结构网格条纹图像 $I_0(x, y)$ 、 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$, 其强度分布的表达式为

$$I_0(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y), \quad (8)$$

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y), \quad (9)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I'''(x, y), \quad (10)$$

式中: $I'(x, y)$ 表示与检测区域条纹图像和背景照度相关的平均强度; $I''(x, y)$ 、 $I'''(x, y)$ 分别表示与检测区域纵向、横向条纹图像对比度和表面反射率相关的调制强度。

当伪装物体侵入检测区域, 检测区域条纹受伪装物体调制变形, 相机采集到检测的伪装物体条纹图像 $J_0(x, y)$ 、 $J_1(x, y)$ 、 $J_2(x, y)$, 其强度分布的表达式为

$$J_0(x, y) = J'(x, y) - J''(x, y), \quad (11)$$

$$J_1(x, y) = J'(x, y) + J''(x, y), \quad (12)$$

$$J_2(x, y) = J'(x, y) + J'''(x, y), \quad (13)$$

式中: $J'(x, y)$ 表示与检测的伪装物体条纹图像和背景照度相关的平均强度; $J''(x, y)$ 、 $J'''(x, y)$ 表示与检测的伪装物体纵向、横向条纹图像对比度和表面反射率相关的调制强度。

2.2 伪装物体检测原理

伪装物体检测技术的原理流程如图 3 所示。将所采集的图像上传至计算机, 分别对检测区域的条纹图像 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 和检测的伪装物体条纹图像 $J_1(x, y)$ 、 $J_2(x, y)$ 进行二值化与 Sobel 边缘检测算子处理^[16-17]。其中, 平均光强作为二值化的强度阈值可分别表示为

$$I'(x, y) = [I_0(x, y) + I_1(x, y)]/2, \quad (14)$$

$$J'(x, y) = [J_0(x, y) + J_1(x, y)]/2. \quad (15)$$

对 Sobel 边缘检测算子中的卷积因子分别与原条纹图像 $A(x, y)$ 进行平面卷积运算, 求取横向和纵向梯度 G_x 和 G_y , 其数学表达式为

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A(x, y), \quad (16)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A(x, y), \quad (17)$$

式中: $A(x, y)$ 取 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 和 $J_1(x, y)$ 、 $J_2(x, y)$ 时, 对应求得横向和纵向梯度为 G_{x_n} 、 G_{y_n} 和 G'_{x_n} 、 G'_{y_n} 。

因此, 提取出检测区域的边缘图像 $E_1(x, y)$ 、 $E_2(x, y)$ 和检测伪装物体的边缘图像 $F_1(x, y)$ 、 $F_2(x, y)$ 的数学表达形式可表示为

$$E_n(x, y) = \sqrt{G_{x_n} + G_{y_n}} \approx |G_{x_n}| + |G_{y_n}|, \quad (18)$$

$$F_n(x, y) = \sqrt{G'_{x_n} + G'_{y_n}} \approx |G'_{x_n}| + |G'_{y_n}|. \quad (19)$$

对应求取 $E_1(x, y)$ 、 $E_2(x, y)$ 与 $F_1(x, y)$ 、

$F_2(x, y)$ 的绝对差值 $D_1(x, y)$ 、 $D_2(x, y)$ ，并求或运算，即可快速完整地检测得网格化伪装物体 $D(x, y)$ 。数学计算公式可表达为

$$D_1(x, y) = |E_1(x, y) - F_1(x, y)|, \quad (20)$$

$$D_2(x, y) = |E_2(x, y) - F_2(x, y)|, \quad (21)$$

$$D(x, y) = D_1(x, y) + D_2(x, y). \quad (22)$$

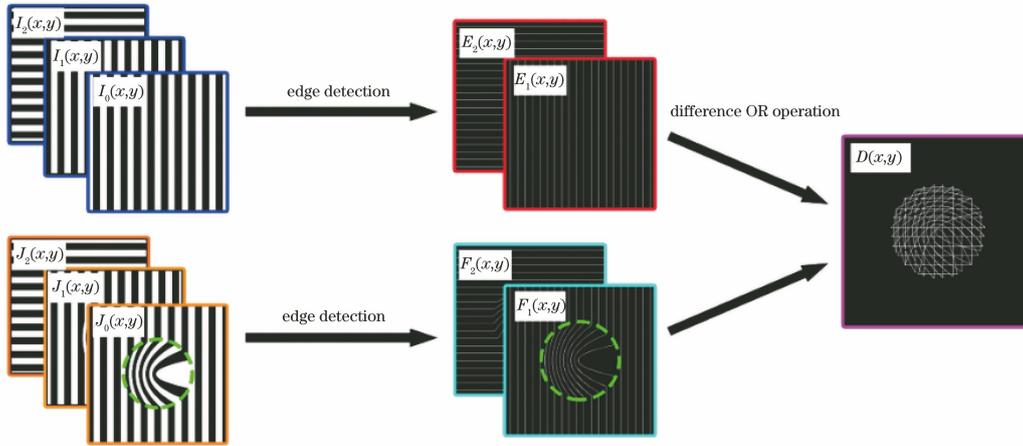


图 3 伪装物体检测技术原理流程图

Fig. 3 Principal flow chart of camouflage object detection technology

2.3 阴影掩模提取与条纹错位消除

受光照和拍摄角度等因素的影响，相机拍摄伪装物体时，其背景常常存有阴影，该阴影会影响二值条纹投影伪装物体检测结果，最终无法提取出目标的完整轮廓信息。依据 $J_0(x, y)$ 和 $J_1(x, y)$ 中互补二值条纹的差异特征，求取图像阴影部分的掩模图像 $S_{\text{mask}}(x, y)$ ^[18]，提取过程示意图如图 4 所示。然后对检测结果 $D(x, y)$ 和掩模图像 $S_{\text{mask}}(x, y)$ 取与运算，即可达到剔除检测结果图中物体阴影信息的效果。提取阴影部分掩模图像 $S_{\text{mask}}(x, y)$ 的数学表达式可表示为

$$S_{\text{mask}}(x, y) = \begin{cases} 1, & |J_0(x, y) - J_1(x, y)| < J'(x, y)/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases}. \quad (23)$$

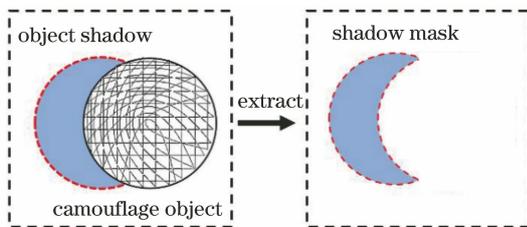


图 4 提取阴影部分掩模图像示意图

Fig. 4 Schematic diagram of extracting shadow partial mask image

考虑到相机拍摄时可能会因轻微的抖动，造成背景条纹边缘图像在差分处理时出现错位现象，但往往仅有几个像素。因此，分别对 $E_1(x, y)$ 、 $E_2(x, y)$ 和 $F_1(x, y)$ 、 $F_2(x, y)$ 采用相同的强度阈值的形态学膨胀运算增加条纹边缘像素，以消除差或运算后的大部分对象^[19]。对于结果中仍可能存在的细小边缘，可利用腐蚀运算进行剔除^[20]，确保较为完整地消除网格条纹背景，实现快速准确地检测出伪装物体的真实信息的目的。

3 仿真实验分析

仿真实验使用计算机 DESKTOP-VNL1L75 (Windows 10 64 位) 和 MATLAB R2019a 软件作为实验平台，通过建立检测区域和伪装物体的模型，验证本文所提方法在不同的噪声信息、模糊效果和条纹周期的干扰因素下的准确性与有效性。针对伪装检测技术会受到检测目标实际信息的影响，仿真时建立 400 pixel × 400 pixel 的有界矩形平面作为系统的检测区域，三维模型图如图 5(a) 所示。根据实际伪装物体与检测区域之间的高度差异，以过矩形平面中心的正垂线为母线，建立一个底面圆曲线直径为 200 pixel 的圆锥面作为伪装物体，其垂直方向上视图如图 5(b) 所示，三维视图及高度尺寸如图 5(c) 所示。

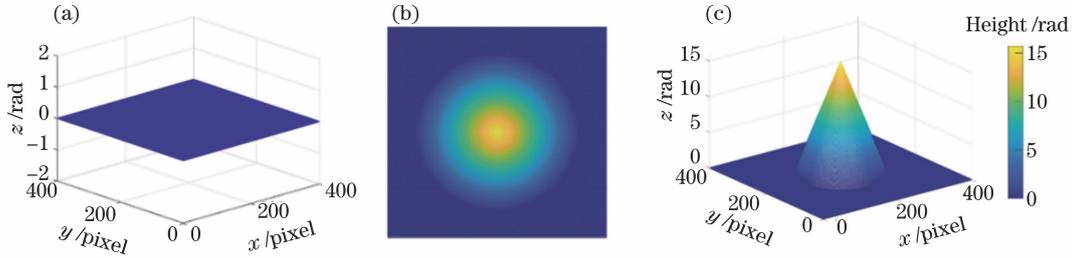


图 5 检测区域与伪装物体模型图。(a)检测区域三维模型;(b)伪装物体垂直视图;(c)伪装物体三维模型

Fig. 5 Detection area and camouflage object model. (a) Three-dimensional model of detection area; (b) vertical view of camouflage object; (c) three-dimensional model of camouflage object

3.1 噪声强度

实际应用中,伪装检测技术的实行会受到自然环境(风沙、雨雪等)、拍摄设备镜片久置积灰等因素的影响,对相机和投影仪的图像采集过程产生色斑或污渍干扰,大大增加准确获取伪装目标真实

信息的难度。图像信噪比(SNR)近似估计为图像信号与噪声方差之比,故可作为衡量图像质量高低的重要指标^[21-22]。仿真实验中通过添加不同 SNR 噪声强度的高斯白噪声,模拟验证该项技术的鲁棒性与有效性。

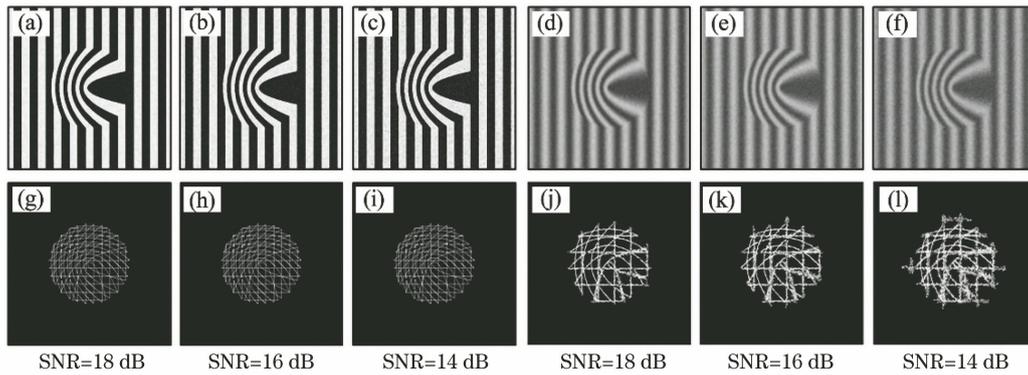


图 6 不同 SNR 噪声强度对伪装检测的影响。(a)~(c)本文方法的条纹图;(d)~(f)文献[6]方法的条纹图;

(g)~(i)本文方法的检测结果图;(j)~(l)文献[6]方法的伪装检测结果图

Fig. 6 Influence of different SNR noise intensities on camouflage detection. (a)–(c) Fringe patterns of proposed method; (d)–(f) fringe patterns of Ref. [6] method; (g)–(i) camouflage detection results of proposed method; (j)–(l) camouflage detection results of Ref. [6] method

分别在本文方法与文献[6]方法中向相同周期条纹的伪装物体检测区域内添加 SNR 分别为 18 dB, 16 dB 和 14 dB 强度的高斯白噪声,如图 6 (a)~(f)所示,对应的仿真实验结果图如图 6 (g)~(l)所示。对比分析结果图可以看出,本文方法的检测结果图中网格化伪装物体边缘信息较为完整,说明二值条纹投影伪装物体检测技术即使在含大量噪声的低信噪比环境下,仍能有效地消除噪声的干扰。应该指出的是,文献[6]方法中使用的是阈值分割算法获取边缘,造成边缘条纹密度在相同实验环境下会疏于本文方法中边缘检测提取的条纹。

为了进一步评估本文所提方法的有效性,我们对图 6 的伪装检测结果进行量化分析对比。表 1 给出了 SNR 分别为 18 dB, 16 dB 和 14 dB 噪声强度环境下检测结果的正确率和结构相似性指数

(SSIM)^[23]。受噪声影响下伪装检测结果图的点数中,与真实提取的伪装物体边缘重合的点可定义为正确的点数,则正确率即为正确的点数在总点数中的占比。SSIM 的数学表达式可表示为

$$R_{SSIM}(x, y) = f[l(x, y), c(x, y), s(x, y)] = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma, \quad (24)$$

式中: x 和 y 代表对比图像; $\alpha > 0, \beta > 0$ 且 $\gamma > 0$; $l(x, y)$ 是亮度对比函数; $c(x, y)$ 是对比度对比函数; $s(x, y)$ 是结构对比函数。其函数表达形式分别为

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (25)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_{xy} + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (26)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x \sigma_y + C_3}, \quad (27)$$

式中: μ_x 和 μ_y 分别为 x 和 y 的平均值; σ_x 和 σ_y 分

别为 x 和 y 的标准差, σ_{xy} 为 x 和 y 的协方差; C_1 、 C_2 和 C_3 为常数。 $R_{SSIM}(x, y) \in [0, 1]$, 且 SSIM 值越大表示两张图像越相似。

表 1 不同 SNR 噪声强度环境下正确率和 SSIM 数值对比

Table 1 Comparison of correct rate and SSIM values under different SNR noise intensities

Item	Proposed method			Ref. [6] method			
	SNR / dB	18	16	14	18	16	14
Number of correct points		6394	6358	6172	5097	5026	4989
Correct rate / %		99.95	99.39	96.48	81.14	80.12	78.49
SSIM / %		99.98	99.82	98.83	87.87	85.43	80.31

当 SNR 分别为 18 dB, 16 dB 和 14 dB 的噪声强度时, 本文方法的伪装检测结果的正确率分别可达到 99.95%、99.39% 和 96.48%, 相应的 SSIM 值分别可达到 99.98%、99.82% 和 98.83%。数据表明, 本文方法能够在不同噪声强度的影响下, 较为有效地执行去噪。与文献[6]方法的仿真结果数据相比, 本文方法仅采用三幅二值条纹图像进行伪装检测就可达到更高的正确率和结构相似性, 验证了本文方法的优越性。

3.2 离焦模糊

相机设备采集检测区域图像出现离焦问题时, 采集到检测的伪装物体条纹图上会产生模糊的效果^[24], 严重影响伪装检测的结果。仿真实验中通过对相机采集的检测区域和检测的伪装物体图像选择多种标准偏差的高斯滤波器, 实现图像不同程度的滤波模糊, 并将处理结果图分析对比, 定量评估检测质量, 以此验证该方法在离焦模糊环境下提取到伪

装物体真实信息的完整性。

图 7(a)~(f)是在高斯滤波器标准偏差 σ 分别为 1、3 和 5 的滤波模糊条件下本文方法与文献[6]方法的条纹图, 所对应仿真实验的结果图如图 7(g)~(l)所示。可以看出, 由于二值条纹对比度高的优势, 二值条纹边缘离焦模糊时, 二值化处理可大大消除该因素的影响, 有效保护条纹边界, 使得边缘检测图像线条清晰且完整。表 2 量化得到了标准偏差为 1、3 和 5 的滤波模糊环境下本文方法与文献[6]方法的伪装物体检测结果的正确率和 SSIM 数值。其中, 本文方法的正确率分别可达到 100.00%、98.61% 和 96.44%, 对应的 SSIM 数值达到了 100.00%、98.77% 和 97.92%。对比文献[6]方法在不同滤波模糊环境下的正确率和 SSIM 值可知, 本文方法在提高处理速度的同时, 仍可有效地解决离焦模糊对检测结果的干扰, 即使在高模糊的环境下, 也能较为完整地提取出伪装目标的边缘轮廓信息。

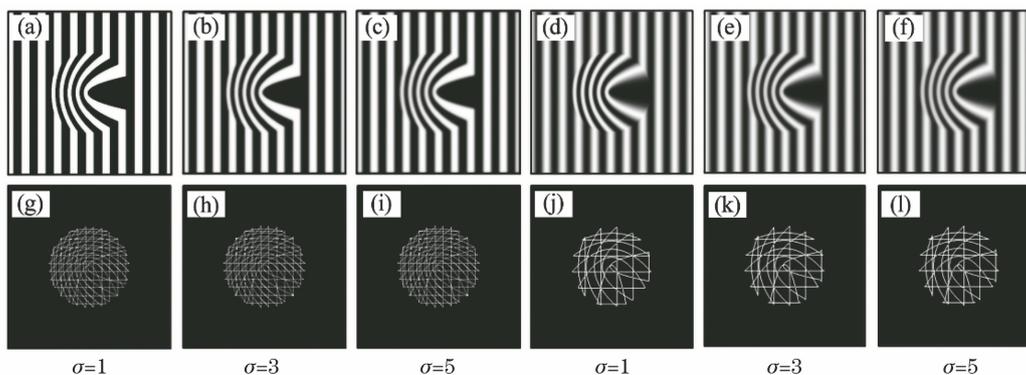


图 7 滤波模糊对伪装检测的影响。(a)~(c)本文方法的条纹图;(d)~(f)文献[6]方法的条纹图;

(g)~(i)本文方法的伪装检测结果图;(j)~(l)文献[6]方法的伪装检测结果图

Fig. 7 Influence of filter blur on camouflage detection. (a)~(c) Fringe patterns of proposed method; (d)~(f) fringe patterns of Ref. [6] method; (g)~(i) camouflage detection results of proposed method; (j)~(l) camouflage detection results of Ref. [6] method

3.3 条纹周期

投影仪和相机距离伪装物体的远近同样会影响伪装物体检测的结果。为确保二值条纹投影的伪装

物体检测技术准确有效地获取完整的伪装物体边缘轮廓和位置信息, 仿真实验时通过改变条纹图的条纹周期进行伪装物体检测, 并对检测结果图对比分

析,验证在该影响因素下本文方法的可行性。

表 2 不同滤波模糊下正确率和 SSIM 数值对比

Table 2 Comparison of correct rate and SSIM value under different filter blurs

Item	Proposed method			Ref. [6] method			
	σ	1	3	5	1	3	5
Number of correct points		6397	6308	6239	6268	6141	6093
Correct rate / %		100.00	98.61	96.44	99.78	97.76	96.99
SSIM / %		100.00	98.77	97.92	99.63	98.48	98.17

图 8(a)~(e)是条纹周期分别为 20,40,60,80 和 100 pixel 的条纹图,相应的伪装检测结果图如图 8(f)~(j)所示。观察并对比不同条纹周期的条纹图和检测结果图可以看出,条纹周期增加会造成检

测目标结果的边缘轮廓信息出现部分缺失的现象,不能有效地保护目标轮廓边缘。这表明适当增加相机和伪装物体之间的距离,伪装物体表面上的条纹密集,提取到伪装物体的边缘轮廓信息会更加完整。

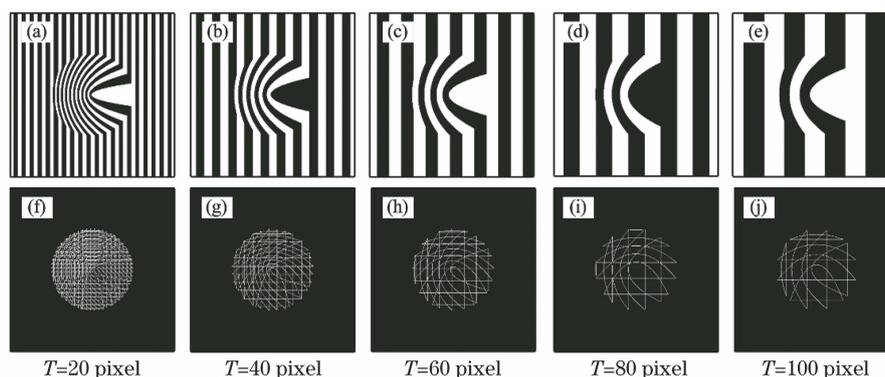


图 8 条纹周期对伪装检测的影响。(a)~(e)条纹周期为 20,40,60,80 和 100 pixel 的条纹图;
(f)~(j)条纹周期为 20,40,60,80 和 100 pixel 的伪装检测结果图

Fig. 8 Influence of fringe period on camouflage detection. (a)~(e) Fringes with 20, 40, 60, 80, and 100 pixel fringes period; (f)~(j) camouflage detection results with 20, 40, 60, 80, and 100 pixel fringes period

3.4 真实实验分析

结合实际复杂环境,实验中搭建了二值条纹投影-采集系统实验平台,分别进行如下三组真实实验,进一步验证本文所提方法。实验环境 1 中,选用有纹理的平面作为检测区域和相同纹理的伪装物体进行伪装检测。实验环境 2 中,更换相同背景纹理的曲折面作为检测区域进行伪装检测。对于实验环境 3,选择在有纹理的平面检测区域前添加多个干扰物体进行伪装检测,三组真实实验示意图如图 9 所示。

三组真实实验的过程与结果图如图 10 所示,图 10(a)~(c)为实验环境 1 的检测过程及结果图,图

10(d)~(f)为实验环境 2 的检测过程及结果图,图 10(g)~(i)为实验环境 3 的检测过程及结果图。观察可发现由于真实情况下伪装物体受光线与拍摄角度的影响常伴有阴影,并可能因为实验平台轻微的抖动造成条纹边缘存有错位现象,导致二值条纹投影的伪装物体检测结果中无法提取出伪装物体完整的真实信息。因此,经掩模提取算法和膨胀运算处理优化后,检测结果图中三组真实实验伪装物体的位置和边缘轮廓信息均有效且较为完整。对比图 11 中文献[6]方法的检测结果,说明利用二值条纹投影的伪装物体检测技术不仅能够有效地剔除物体

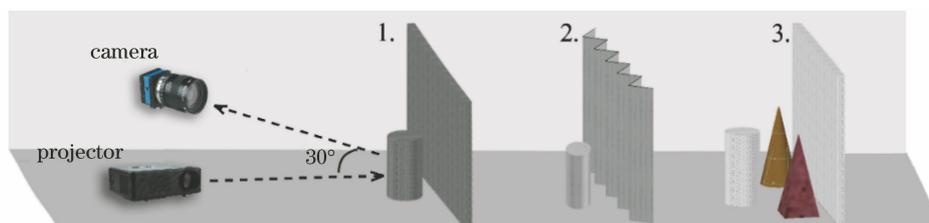


图 9 真实实验示意图

Fig. 9 Schematic diagram of real experiment

背景阴影,准确地获取伪装物体边缘轮廓和位置信息,而且简化了图像的处理方法,提高了伪装检测处

理速度,并可广泛适用于多种复杂实际环境中,具有良好的抗干扰性能。

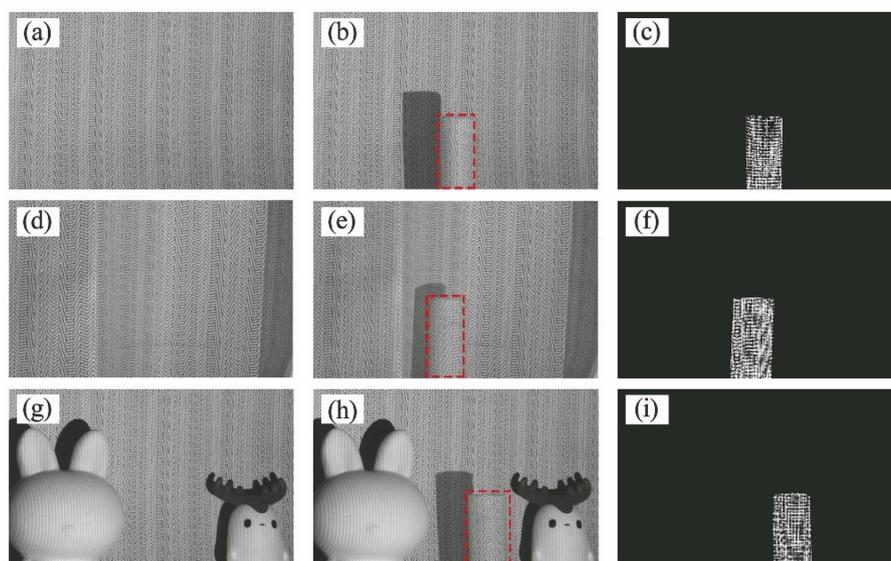


图 10 真实实验环境伪装检测的过程与结果图。(a)~(c)实验环境 1;(d)~(f)实验环境 2;(g)~(i)实验环境 3
Fig. 10 Process and result charts of camouflage detection in real experimental environment. (a)~(c) Experimental environment 1; (d)~(f) experimental environment 2; (g)~(i) experimental environment 3

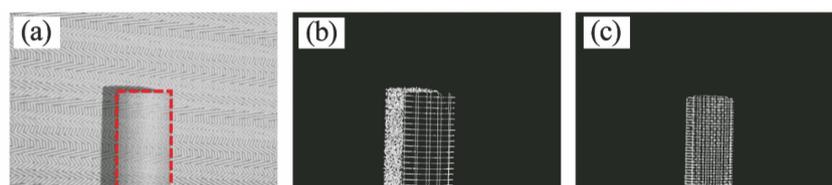


图 11 真实实验伪装检测结果对比图。(a)实验环境;(b)文献[6]方法;(c)本文方法
Fig. 11 Comparison of real experimental camouflage detection results. (a) Experimental environment; (b) Ref. [6] method; (c) proposed method

4 结 论

二值条纹投影伪装物体检测技术可以简化图像的处理方法,显著地提升条纹对比度和伪装物体的检测速度,实现快速准确检测。本文通过仿真实验对影响伪装检测的噪声强度、离焦模糊、条纹周期因素进行了定性与定量分析,并结合多组不同实验环境下的真实实验结果,验证了该伪装检测技术能快速准确地在线检测出伪装物体的边缘轮廓和位置信息。此外,基于二值条纹图像的掩模提取算法和膨胀运算可以有效地剔除伪装物体图像的阴影部分和消除条纹边缘间的错位现象,使得该项技术具有更广泛的适用性和抗干扰能力,可在军事反间谍、野外搜救、医疗治理等应用领域中开辟更多新的可能。

参 考 文 献

- [1] Niu Y, Sun H, Stevens M. Plant camouflage: ecology, evolution, and implications [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2018, 33(8): 608-618.
- [2] Li S, Florencio D, Li W Q, et al. A fusion framework for camouflaged moving foreground detection in the wavelet domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(8): 3918-3930.
- [3] Le T N, Nguyen T V, Nie Z L, et al. Anabranch network for camouflaged object segmentation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2019, 184: 45-56.
- [4] Zheng Y F, Zhang X W, Wang F, et al. Detection of people with camouflage pattern via dense deconvolution network [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(1): 29-33.
- [5] Rao C P, Reddy A G, Rao C B R. Camouflaged object detection for machine vision applications [J]. International Journal of Speech Technology, 2020, 23(2): 327-335.
- [6] Deng J, Li J, Ding S M, et al. Fringe projection

- decamouflaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106201.
- [7] Ma M C, Deng H X, Zhang J, et al. High speed 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2564-2572.
马孟超, 邓华夏, 张进, 等. 快速离焦投影三维测量技术[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2564-2572.
- [8] Deng J, Li J, Feng H, et al. Order correction algorithm of coded fringe projection technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 250-258.
邓吉, 李健, 封皓, 等. 编码条纹投影技术的阶次校正算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 250-258.
- [9] Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase-shifting and modulation ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704003.
卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制比的结构光三维面形垂直测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704003.
- [10] Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0512003.
冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0512003.
- [11] Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812005.
赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812005.
- [12] Zhu T Y, Dong F, Gong H X. Remote sensing building detection based on binarized semantic segmentation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1228002.
朱天佑, 董峰, 龚惠兴. 基于二值语义分割网络的遥感建筑物检测[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1228002.
- [13] Wang J H, Zhou Y G, Yang Y X. Sign language learning based on high-speed fringe projection profilometry employing defocused binary fringe [J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16(1): 65-74.
- [14] Rosenberg O I, Abookasis D. Hybrid method combining orthogonal projection Fourier transform profilometry and laser speckle imaging for 3D visualization of flow profile [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(13): 1197-1209.
- [15] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [16] Gao J Y, Xu H L, Shao K L, et al. An adaptive edge detection method based on local edge feature descriptor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0604003.
高佳月, 许宏丽, 邵凯亮, 等. 基于局部边缘特征描述子的自适应边缘检测算法[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0604003.
- [17] Hua C J, Xiong X M, Chen Y. Feature extraction of workpiece circular arc contour based on Sobel operator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021011.
化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工作件圆弧轮廓特征提取[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021011.
- [18] Shen Y J, Peng F, Huang X Y, et al. Adaptive gradient-based source and mask co-optimization with process awareness [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(12): 121102.
- [19] He C E, Xu H J, Wang Z, et al. Automatic segmentation algorithm for multimodal magnetic resonance-based brain tumor images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0610001.
何承恩, 徐慧君, 王忠, 等. 多模态磁共振脑肿瘤图像自动分割算法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0610001.
- [20] Zhao Q S, Wang Y Y, Wang X P, et al. Substation infrared image segmentation based on novel threshold selection method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0810002.
赵庆生, 王雨滢, 王旭平, 等. 基于新型阈值选择方法的变电站红外图像分割[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0810002.
- [21] Tang R Y, Liu D A, Zhu J Q. Micro-size damage adaptive detection technology based on local signal-to-noise ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0704001.
唐如欲, 刘德安, 朱健强. 基于局部信噪比的微小损伤自适应检测技术研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0704001.
- [22] Xiao K, Tian L J, Wang Z Y. Fast super-resolution fluorescence microscopy imaging with low signal-to-noise ratio based on deep learning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1007002.
肖康, 田立君, 王中阳. 基于深度学习的低信噪比下的快速超分辨荧光显微成像[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1007002.
- [23] Tao Z S, Zhang J H, Wang L, et al. Image

inpainting algorithm based on edge feature and pixel structure similarity[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(10): 1768-1776.

陶兆胜, 张敬寒, 王磊, 等. 基于边缘特征和像素结构相似度的图像修复算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(10): 1768-1776.

[24] Wei H, Cui H H, Cheng X S, et al. Image defocus simulation technology applied to evaluation of focused morphology recovery algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1111001.

韦号, 崔海华, 程筱胜, 等. 一种用于评价聚焦形貌恢复算法的图像离焦仿真技术[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1111001.