

引用格式: YU Jun, LIU Haoyang, ZHANG Yunhui, et al. An Evaluation Method of Optical Camouflage Effect Based on Contour Deformation Degree[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0610001

喻钧,刘昊阳,张云辉,等.一种基于轮廓形变度的光学伪装效果评价方法[J].光子学报,2021,50(6):0610001

一种基于轮廓形变度的光学伪装效果评价方法

喻钧¹,刘昊阳¹,张云辉¹,胡志毅²,初苗³

(1 西安工业大学 计算机科学与工程学院,西安 710021)

(2 中国人民解放军 32182 部队,北京 100042)

(3 西安工业大学 艺术与传媒学院,西安 710021)

摘要:针对光学伪装效果评价中的目标轮廓变形问题,提出了一种基于轮廓形变度的二值统计矩算法。首先,对伪装目标的原始背景图像进行二值化处理,然后对背景图像均匀分割,提取目标的轮廓特征,以此构造一个轮廓特征向量的二值统计矩阵。最后,采用欧氏距离与余弦归一化的方法对二值统计矩进行计算,获得目标的轮廓形变度值。实验结果表明,提出的二值统计矩算法可以有效地提取目标的轮廓特征;轮廓形变度指标达到了 0.905 ± 0.004 和 0.77 ± 0.80 ;与传统 Hu 矩算法相比,主成分因子分别提高了 27% 和 7%,算法效率提高了 69.8%。该方法能够从目标轮廓的角度有效地评估光学迷彩伪装效果。

关键词:光学伪装效果;目标轮廓;轮廓形变度;二值统计矩

中图分类号: TP751

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215006.0610001

An Evaluation Method of Optical Camouflage Effect Based on Contour Deformation Degree

YU Jun¹, LIU Haoyang¹, ZHANG Yunhui¹, HU Zhiyi², CHU Miao³

(1 School of Computer Science and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 PLA 32182, Beijing 100042, China)

(3 School of Art and Media, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the problem of target contour deformation in the effect evaluation of optical camouflage, this paper proposes a binary statistical moment algorithm based on contour deformation degree. Firstly, the original background image of a camouflage target is binarized, followed that the background image is evenly segmented, and then the contour features of the target are extracted, so that a binary statistical matrix of the contour feature vector is constructed. Finally, both the Euclidean distance and Cosine normalization are adopted to calculate the binary statistical moment, so as to obtain the contour deformation degree of the target. The experimental results show that, the proposed algorithm can effectively extract the contour features of the target; the contour deformation index reaches 0.905 ± 0.004 and 0.77 ± 0.80 ; compared with the traditional Hu moment algorithm, the principal component factor is increased by 27% and 7% respectively, and the algorithm efficiency is improved by 69.8%. The optical camouflage effect can be effectively evaluated from the perspective of the target contour.

Key words: Optical camouflage effect; Target contour; Contour deformation degree; Binary statistical moment

OCIS Codes: 100.4994; 330.4595; 120.4630

基金项目:国家自然科学基金(No.51905407)

第一作者:喻钧(1970—),女,教授,硕士,主要研究方向为机器学习与模式识别。Email: yujun@xatu.edu.cn

通讯作者:刘昊阳(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为计算机视觉。Email: 502339341@qq.com

收稿日期:2021-02-01;录用日期:2021-04-09

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

伪装的实质就是尽量减少目标与周围背景在可见光、热红外波段的特征差异,以降低目标的可探测性。而目标探测却是尽可能发现和识别光学、红外目标^[1-2]。迷彩伪装是通过模拟目标周围自然背景的颜色、亮度、纹理等基本特征,打破伪装目标与背景的原有关线,使目标轮廓发生变形,进而加大敌方侦察识别目标的难度,从而达到伪装的目的^[3-5]。

近年来,国内外学者对于迷彩伪装效果评价做了大量研究和探索。文献[6]分析了目标发现概率、能见度、亮度对比等评价指标;文献[7]选取了亮度、颜色、纹理、形状、斑点尺寸等5个特征指标,提出基于灰色聚类理论的综合评价方法;文献[8]基于迷彩斑点的颜色、尺寸、反射率等特性建立了基于欧氏距离的伪装器材性能评估模型;文献[9-10]进一步增加了对斑点纹理、斑点形状与配置的分析。上述评价方法都与迷彩斑点本身有关。文献[11-12]通过计算目标与背景在结构、颜色、纹理和统计等特征指标的相似度,加权计算后获得迷彩的光学伪装效果。

研究发现,目标在伪装前后的轮廓发生了变形,称之为“轮廓形变度”,对于伪装效果有重要的影响。一般来说,目标轮廓变形越大,目标越不易被判别,伪装效果越好。要计算伪装目标的轮廓形变度,首先要提取目标的轮廓特征^[13]。文献[14]提出一种融合局部二值模式(Local Binary Patterns, LBP)和全局Hu矩特征的方法来提取车辆的形状及轮廓特征。文献[15]采用在灰度共生矩阵中增加主色因素来提取目标的纹理特征,但却导致时间复杂度增加。本文结合文献[14]和文献[15]中算法思想的优势,提出一种二值统计矩的方法来提取目标的轮廓特征,计算出轮廓形变度,从而获得伪装效果的评估结果。

1 轮廓形变度的基本计算方法

轮廓形变度是指两个目标模型在进行比较时,目标轮廓的歪曲变形程度。一般来说,对于两个相同维度的向量,有两种用于计算形变度的方法:欧氏距离算法,余弦归一化算法。

1.1 欧氏距离算法

欧氏距离算法可以用于图像灰度共生矩的比较。欧氏距离 d 是指 n 维欧氏空间中的两个 n 维向量 $\alpha(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n})$ 与 $\beta(X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n})$ 间的距离,如式(1)所示。

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_{2i})^2} \quad (1)$$

由于欧氏距离的结果取值范围跨度过大,为了便于不同向量之间的比较,通常需对欧氏距离进行归一化。

1.2 余弦归一化算法

余弦距离是指向量空间中两个向量夹角 θ 的余弦值,它可以用于衡量两个不同向量的方向差异。采用余弦归一化算法计算出来的值都落在 $[0, 1]$ 区间内。计算不同目标轮廓的数据集,可以发现,当余弦归一化值落在 $[0.8, 1]$ 时,可知这两个向量所代表的轮廓特征最为接近;当余弦归一化值落在 $[0, 0.5]$ 时,轮廓特征完全不同;当落在 $[0.5, 0.8]$ 时,轮廓特征局部相近。余弦归一化计算如式(2)所示。

假设有两个 n 维向量 $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]$ 与 $B = [B_1, B_2, \dots, B_n]$,两个向量间的余弦距离 u 则等于

$$u = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i)^2}} \quad (2)$$

综上所述,欧氏距离和余弦归一化算法的侧重点是不同的。欧氏距离用于衡量空间点的直线距离,根据两个向量间的距离评判两者是否相近。余弦距离用于衡量空间点在方向上的差异,根据两个向量间的夹角大小来判断其是否相近。要计算两个目标图像的轮廓形变度,仅仅通过计算欧氏距离或余弦夹角对轮廓的表征作用是不够的,因为形变度结果曲线可能会出现断崖式上升或者下跌的凸点或凹点。为了让形变度结果曲线尽可能地趋于一致,需要一种既能用距离评估、又能用角度评估的方法来计算轮廓形变度,为此本

文提出一种线性回归的轮廓形变度算法。

2 轮廓特征的提取:二值统计矩

在计算轮廓形变度之前,首先需要提取一幅图像的轮廓特征。如前所述,本文提出了一种新的轮廓特征提取方法:二值统计矩。

2.1 二值统计矩的构建

二值统计矩的构建过程,是先将一幅彩色图像转化为二值化图像,然后将图像均匀分块并统计每个图像块的像素特征,得到一个可以描述图像轮廓的矩阵^[16]。由于实际的伪装场景往往有些复杂,为了直观地展示二值统计矩的逻辑过程,同时简化数据计算,本文采用一个简化的数据模型(迷彩装甲车)作为原始的彩色图像。具体步骤如下:

步骤1:选择一幅 $m \times m$ (m 为像素个数) 的彩色图像(如图1所示),将颜色空间从RGB转到HSV,计算其双峰直方图,选取双峰之间的波谷作为阈值,对图像进行二值化处理,得到一幅二值化灰度图像(如图2)。可以看出,经过二值化处理后的图像,其轮廓特征十分明显。



图1 原始的彩色图像
Fig. 1 Original color image



图2 二值化图像
Fig. 2 Binary image

步骤2:将二值化图像均匀分成若干方块。假设被划分为25个方块,每个方块看作是一个图像单元。按照螺旋形的顺序对每个方块进行标记,方块内的数字代表它所在的图像单元标号(如图3所示)。

步骤3:对标记好的图像按照标号数字从小到大的顺序,依次对每个图像单元进行处理,然后分别统计每一个图像单元的白色和黑色像素点个数。可以发现,当一个图像单元内的黑色像素点超过白色像素点数量的 $3/4$ 时,该图像单元的特征表现为黑色特征;反之,当黑色像素点少于白色像素点数量的 $3/4$ 时,则表现为白色特征。按照这个规律,对每个图像单元进行标注处理。例如:对于1号图像单元,几乎全为白色像素点,标记为白色特征;对于3号图像单元,黑色像素点数量超过白色像素点数量的 $3/4$,标记为黑色特征;对于25号图像单元,几乎全为黑色像素点,标记为黑色特征。

1	2	3	4	5
16	17	18	19	6
15	24	25	20	7
14	23	22	21	8
13	12	11	10	9

图3 图像均匀分块后的状态
Fig. 3 State of image after uniform blocking

0	0	1	0	0
0	1	0	0	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1
1	1	1	1	0

图4 标记后的二值统计矩阵
Fig. 4 Marked binary statistical matrix

步骤4:将标记黑色特征的图像单元用1来表示,白色特征的单元用0来表示,至此构建成一个 $\sqrt{m} \times \sqrt{m}$ 的二值统计矩阵,如图4所示。

经反复试验发现,在分割图像时,如果图像分块过多,会导致计算量增大;如果分块过少,图像特征就不明显。当 $m \times m$ 的图像分割为 $\sqrt{m} \times \sqrt{m}$ 个等分的图像时(\sqrt{m} 默认向下取整),目标的轮廓边界最清楚,计算轮廓形变度的主客观符合度达到最佳状态。

2.2 二值统计矩的一维化

为了便于计算欧氏距离与余弦距离,将图4的二值统计矩阵转换为一维向量的形式,称为轮廓特征向量。转换的方法是按照图3中标号从小到大的顺序,将图4中与之对应位置的特征值依次取出,排列为二维向量,即轮廓特征向量,如图5所示。

0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1

图5 轮廓特征向量

Fig. 5 Contour feature vector

3 轮廓形变度算法的设计

前面所述的欧氏距离、余弦归一化算法,都是通过计算单一判别元素(距离或方向)来计算形变度的。本文提出的轮廓形变度算法融合了距离与方向这两个元素,可以有效去除结果曲线中的噪声点^[17]。

3.1 轮廓形变度的计算步骤

轮廓形变度的计算分为四个步骤:

步骤1:计算轮廓特征向量的欧氏距离和余弦距离。分别计算任意两幅图像的二值统计矩,然后转换为对应的轮廓特征向量,并且对这两个向量计算欧氏距离和余弦距离。

步骤2:计算轮廓形变度值。计算轮廓形变度值如式(3)、(4)所示。

$$y = \frac{1}{ad + cu} \quad (3)$$

$$a + c = 1 \quad (4)$$

式中, d 代表欧氏距离, u 代表余弦距离, a 、 c 为权重值且被式(4)所约束, y 是当前权重分配下的轮廓形变度值。

步骤3:以穷举权重的方式计算并获得轮廓形变度值的结果集。

所谓穷举权重的方式,就是指在一个确定区间内,以某一固定步长将此区间内可能的权重分配算尽。例如,以0.001为步长,在 $[0, 1]$ 区间内进行计算,权重系数可以是($a=0.001, c=0.999$),或($a=0.002, c=0.998$),依此类推,可以穷举999种权重分配的可能性。每一次用权重分配计算的结果构成一个轮廓形变度结果集中的元素,直至算完穷举的全部权重系数,最终得到一个轮廓形变度值的结果集。

要确定权重系数的值,可以采用式(5)。其中 a 代表式(4)中的权重值, n 代表计数器, s 代表步长。

$$\begin{aligned} a &= n \times s \\ n &\subseteq [0, \frac{1}{s}] \end{aligned} \quad (5)$$

步骤4:一元回归得到最终的轮廓形变度值。

将步骤3算出的轮廓形变度结果集经过一元回归^[18],如式(6)所示(k 表示轮廓形变度的波动程度, b 为轮廓形变度值),进而可以得出 x 和 y 值之间的线性关系,如式(7)所示,最后获得一个在 $[0, 1]$ 区间的 b 值,即最终的轮廓形变度值。

$$\min[f(x)] = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (k + bx_i)]^2 \quad (6)$$

$$y = kx + b \quad (7)$$

至此,轮廓形变度计算完成。

3.2 轮廓形变度算法的实现流程

轮廓形变度算法的实现流程如图6所示。具体步骤如下。

步骤1:输入一个图像数据集,假设共包括 N 张图片 $I_i(i=1,2,3,\dots,N)$ 。

步骤2:顺序挑选一张图像 $I_i(i=1,2,3,\dots,N)$ 作为源图。

步骤3:再选取另一张图像 $I_j(i=1,2,3,\dots,N,i\neq j)$ 作为目标图。

步骤4:计算图像 I_i 和图像 I_j 的二值统计矩,并分别转化为一维轮廓特征向量 C_i 与 C_j 。

步骤5:对两个轮廓特征向量 C_i 与 C_j 使用轮廓形变度算法,计算出轮廓形变度 O_{ij} 。

步骤6:重复执行步骤2~步骤5,直到对于图像 I_i 来说,获得全部 $N-1$ 个轮廓形变度值。

步骤7:重复执行步骤6,直到数据集中的所有图像都两两计算完毕,最终得到一个包括 N 个值的轮廓形变度结果集 O 。

步骤8:利用式(6),将结果集 O 进行一元回归,得到的回归式(7)中的 b 值就是最终的轮廓形变度 S 。

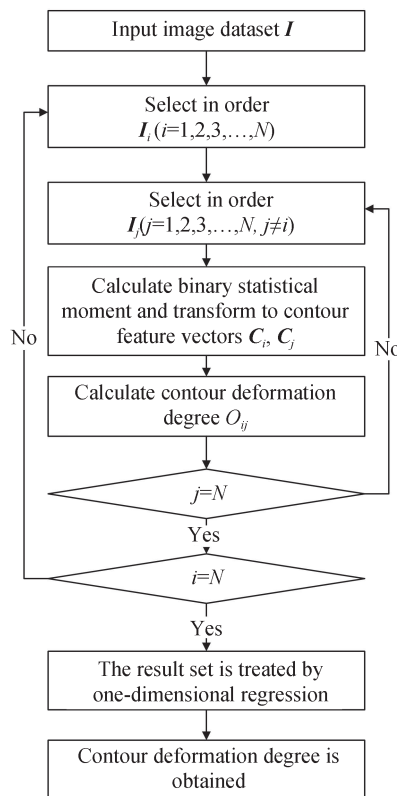


图6 轮廓形变度算法流程

Fig. 6 Flow chart of contour deformation degree algorithm

3.3 基于轮廓形变度的光学伪装效果评价

光学伪装效果评价方法如图7所示。采用文献[12]的方法,通过计算伪装目标与自然背景的结构相似度、纹理相似度、颜色相似度以及轮廓形变度等4个迷彩伪装效果的评价指标,并对这4个指标进行加权求和,得到光学伪装效果评价的最终结果。

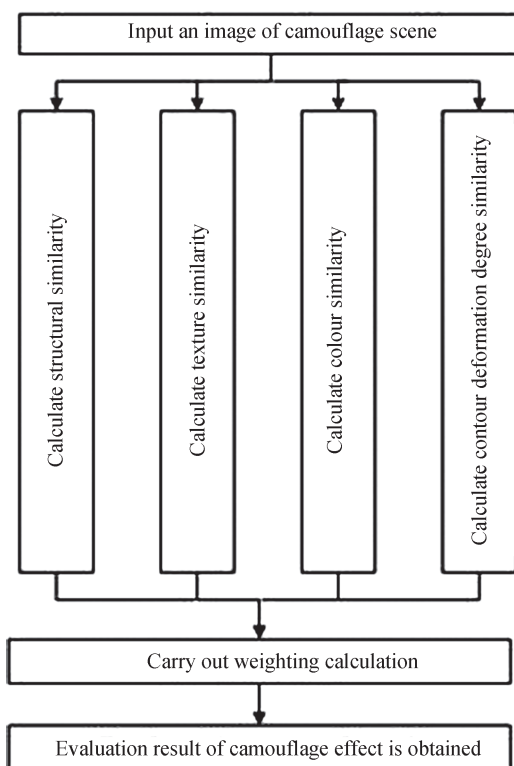


图7 伪装效果评价方法

Fig. 7 Evaluation method of camouflage effect

4 对比实验结果及分析

为了验证本文提出的二值统计矩与传统Hu矩算法的优劣,我们选取不同的数据集进行对比实验验证,并对实验结果进行了定性、定量分析。本实验的验证数据集分为两类,一类是轮廓相近图像数据集(来自网络的1080张不同装甲车图像),另一类是轮廓不相近图像数据集(来源于Kaggle竞赛的2042张任意物体的图像)。

4.1 使用同一算法在不同图像数据集的对比实验

用MATLAB工具实现了第3.1节所描述的轮廓形变度计算。对于目标轮廓不相近图像数据集、目标轮廓相近图像数据集,运行后的实验结果分别如图8~9所示。其中,横坐标代表图像数据集中的图像编号,纵坐标代表轮廓形变度值(取值范围为 $[0,1]$)。+号代表数据点,红色直线代表一元回归线。我们将一元回

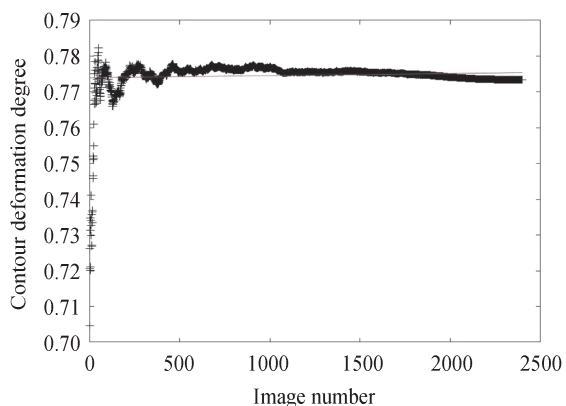


图8 目标轮廓不相近图像的实验效果

Fig. 8 Experimental results of images with different contour

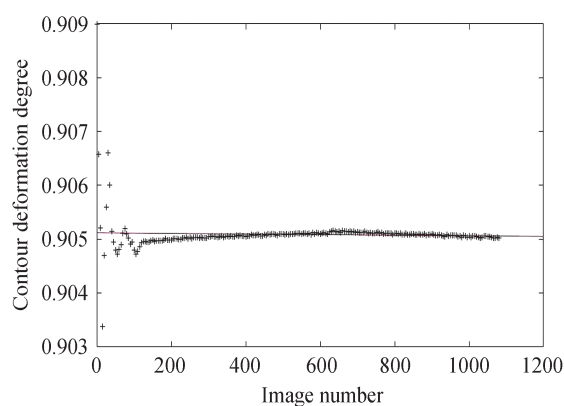


图9 目标轮廓相近图像的实验效果

Fig. 9 Experimental results of images with similar contour

归的轮廓形变度值抽象为“ $M \pm F$ ”表达形式。其中 M 代表主成分因子,等同于一元回归式中的 b 值; F 代表波动因子,说明轮廓形变度值的波动程度。

可以看出,图8的整体走势呈下降趋势,曲线波动幅度大,轮廓形变度值为 0.77 ± 0.80 ;图9的整体走势呈上升趋势,曲线波动程度小,轮廓形变度值为 0.905 ± 0.004 。这说明图9的主成分因子远远大于图8的主成分因子,同时波动因子远远小于图8的波动因子,本文算法具有主客观一致性。

4.2 使用不同算法在同一图像数据集的对比实验

4.2.1 在轮廓相近图像数据集的实验

对于轮廓相近图像数据集,分别采用Hu矩算法和二值统计矩算法进行对比实验。实验结果分别如图10~11所示。从图10可以得出Hu矩算法的计算结果在 0.635 ± 0.02 之间波动,从图11得出二值统计矩算法的计算结果在 0.905 ± 0.004 之间波动。由于图10的主成分因子 0.635 远远小于图11的 0.905 ,再次印证了二值统计矩算法在有效性、主客观一致性等方面均高于Hu矩算法。

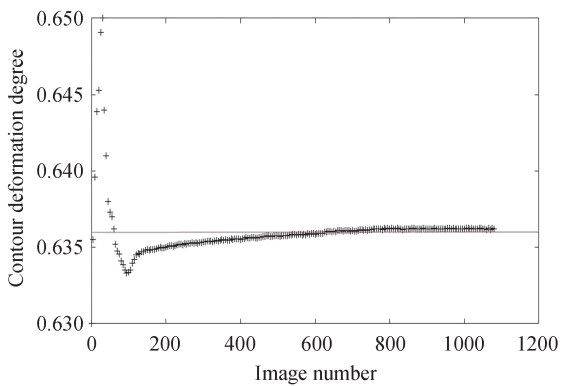


图10 Hu矩对轮廓相近图像的实验效果

Fig. 10 Experimental effect of Hu moment on images with similar contour

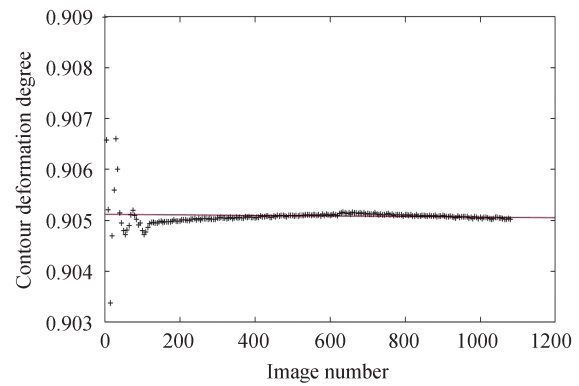


图11 二值统计矩对轮廓相近图像的实验效果

Fig. 11 Experimental effect of binary statistical moments on images with similar contour

4.2.2 轮廓不相近图像数据集

对于轮廓不相近图像数据集,使用Hu矩算法和二值统计矩算法进行了对比实验,实验结果分别如图12~13所示。Hu矩算法的计算结果为 0.72 ± 0.02 ;二值统计矩算法结果为 0.77 ± 0.80 。这说明两个算法的轮廓识别效果基本相当。在算法效率上,计算单张图片Hu矩算法费时302 s,而二值统计矩仅需91 s,提高了69.8%。如表1所示。

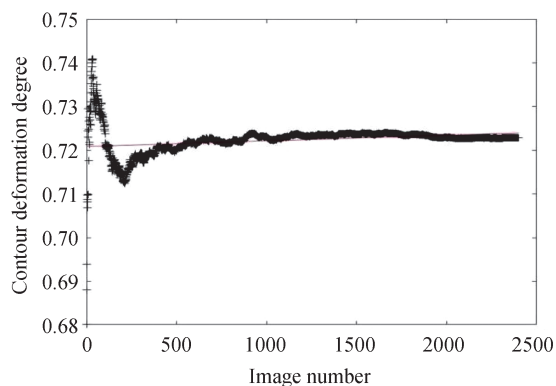


图12 Hu矩对轮廓不相近图像的实验效果

Fig. 12 Experimental effect of Hu moment algorithm on image with different contour

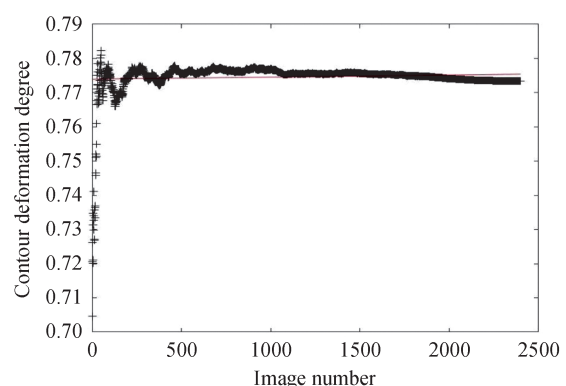


图13 本文算法对轮廓不相近图像的实验效果

Fig. 13 Experimental effect of this algorithm on images with different contours

表1 不同算法在图像数据集上的对比实验结果
 Table 1 Experimental results of different algorithms on image data sets

Algorithm	Profile deformation (contour similar image data set)	Profile deformation(image data sets with different contours)	Detection speed (s·frame ⁻¹)
Binary statistical moment	0.905±0.004	0.77±0.80	91
Hu moment	0.635±0.01	0.72±0.02	302

5 结论

针对光学伪装效果评价中的目标轮廓变形问题,将目标伪装前后的轮廓变形程度作为一种新的迷彩伪装效果评价指标,提出了一种新的轮廓特征提取方法:二值统计矩,以及用于计算轮廓形变度的算法。经过实验验证,二值统计矩算法比传统Hu矩算法的时间复杂度更低($O(N)$),轮廓形变度指标可以有效地表征迷彩伪装效果。

参考文献

- [1] XIAO Hong, ZHANG Xuemin. Camouflage technology based on visual perception [M]. Beijing: China Textile publishing house, 2020.
肖红,张学民. 基于视知觉的迷彩伪装技术[M]. 北京: 中国纺织出版社有限公司, 2020.
- [2] WEI Shuigen, WANG Chengwei, CHEN Zhen, et al. Infrared dim target detection based on human visual mechanism[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1):0110001.
危水根,王程伟,陈震,等. 基于视觉注意机制的红外弱小目标检测[J]. 光子学报, 2021, 50(1):0110001.
- [3] 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, 2020, 34(6): 2050017.
- [4] FENG X, CUI G Y, WEI S. Camouflage texture evaluation using saliency map[J]. Multimedia Systems, 2013, 21(2): 93-96.
- [5] WANG Zhan, LI Jie. Postdoctoral Library: background based camouflage design and comprehensive evaluation method [M]. Beijing: Science Press, 2017.
王展,李洁. 博士后文库:基于背景的迷彩伪装设计与综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [6] HU Jianghua, ZHU Chao, WANG Youjun, et al. A method for detecting and evaluating camouflage effect[J]. China Test Technology, 2007, 33(2):67-69.
胡江华,朱超,王友军,等. 一种迷彩伪装效果检测评价方法[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2):67-69.
- [7] WANG Zhan, YAN Yunhui, JIAO Xueyong. Multi index comprehensive evaluation of camouflage based on grey theory [J]. Journal of Military Engineering, 2013, 34(10):1250-1257
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.
- [8] XU Weidong, TANG Jianing, LV Xuliang, et al. A model based on euclidean distance for performance evaluation of camou- flage equipment[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(1):74-76.
许卫东,唐建宁,吕绪良,等. 一种基于欧氏距离的伪装器材性能评估模型[J]. 解放军理工大学学报, 2001, 2(1): 74-76.
- [9] JIA Q I, YU Jun, et al. Evaluation of camouflage effect based on statistical texture features[C]. The United States(New York):ACM International Conference Proceeding Series, 2019:822-825.
- [10] CAO Yi, CAI Hongnian, CHENG Haifeng, et al. Analysis on the technical items of distortion pattern painting [J]. Infrared Technology, 2008, 30(2):118-122.
曹义,才鸿年,程海峰,等. 变形迷彩伪装的技术指标分析[J]. 红外技术, 2008, 30(2):118-122.
- [11] LI Zhonghua, YU Jun, HU Zhiyi, et al. An algorithm for weight distribution of camouflage effect evaluation index[J], Firepower and Command and Control, 2019, 44(10):49-54.
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.
- [12] YU Jun, DAI Jun, HU Zhiyi, et al. A digital camouflage effect evaluation method[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2016, 36(7):528-532.
喻钧,代军,胡志毅,等. 数字迷彩的伪装效果评价[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(7): 528-532.
- [13] LIU Xun, HUA Wenshen, YANG Jia. Camouflage effect evaluation based on hyperspectral detecting technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10):3228-3232.
刘恂,华文深,杨佳. 面向高光谱探测的伪装效果评价方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10):3228-3232.
- [14] LI Chengfei, CHEN Xinhua. Vehicle recognition based on local binary mode and Hu moment features[J]. Progress in

- Laser and Optoelectronics, 2016, 53(10):206-211.
李澄非,陈新华.融合局部二值模式和Hu矩特征的车辆识别[J].激光与光电子学进展,2016,53(10):206-211.
- [15] LU Jun, LI Yang, ZHAO Kangyi, et al. Feature extraction of digital camouflage texture based on main color co-occurrence matrix method[J]. Computer Engineering, 2011, 37(7):246-248.
卢军,李杨,赵康健等.基于主色共生矩阵法的数码迷彩纹理特征提取[J].计算机工程,2011,37(7):246-248.
- [16] ZHANG Jieyu. Local threshold binarization based on image segmentation [J]. Computer Application, 2017, 37(3):827-831.
张洁玉.基于图像分块的局部阈值二值化方法[J].计算机应用,2017,37(3):827-831.
- [17] TIAN Chunjin, PU Yunwei, GUO Yuanpu, et al. Feature extraction method of main ridge section of radar signal fuzzy function based on figure contour[J]. Journal of Military Engineering, 2018, 39(11):2280-2288.
田春瑾,普运伟,郭媛蒲等.基于图形轮廓的雷达信号模糊函数主脊切面特征提取方法[J].兵工学报,2018,39(11):2280-2288.
- [18] LI Zuoyeng, WEI Xiaomei, WANG Jiayang. Univariate linear regression prediction of environmental system based on dimension reduction and error correction of gauge transformation [J]. Journal of Environmental Science, 2019, 39(7):2455-2466
李祚泳,魏小梅,汪嘉杨.规范变换降维与误差修正结合的环境系统的一元线性回归预测[J].环境科学学报,2019,39(7):2455-2466.