

基于容限近集理论的光学伪装评价研究

王 贺 白廷柱

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 在对地面目标光学伪装评价的研究中,根据地面背景伪装图像的特点,提出了一种基于容限近集理论的评价地面目标光学伪装效果的方法。提取伪装图像中的目标和背景区域,将这些区域作为容限空间中的集合分别进行分块,每块子图像作为集合元素,提取各子图像的统计、颜色和纹理等特征,在容限空间中计算背景与目标并集集合的所有容限近似类,用近似测量(tNM)指标评价伪装效果,并将 tNM 与豪斯多夫距离(tHD)比较。结果表明,容限近似理论作为一种新的评价伪装图像伪装效果的方法能很好地代替人眼主观评价;tNM 作为评价伪装效果的指标优于 tHD。

关键词 图像处理;伪装图像评价;容限近集;近似测量

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1210001

Evaluation of Optical Camouflage Based on Tolerance Nearness Sets Theory

Wang He Bai Tingzhu

(Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract On the research of evaluating optical camouflage ground targets, a method using tolerance nearness sets to evaluate ground targets' camouflage effect is proposed, according to the characteristics of the camouflage images. The targets and backgrounds are extracted from these images, which seen as different sets in tolerance space, and divided into numbers of sub-images. Several features such as statistics, color and texture characteristics are extracted from every sub-image and all of tolerance nearness class in background and object sets are calculated. Nearness measure (tNM) is used to evaluate camouflage effect and compared with Hausdorff distance (tHD). The results show that tolerance nearness sets method can well replace human eyes to evaluate camouflage effects and tNM is better than tHD as the evaluation index.

Key words image processing; camouflage-images evaluation; tolerance nearness sets; nearness measure

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 330.5000

1 引 言

伪装的原理就是要使目标的特征与背景相一致,使目标与背景充分相容,这种一致性表现在图像上就是目标与背景的亮度、颜色、纹理和边缘信息的相容程度。以往基于图像的伪装评价方法大都针对图像的某一或某些特征^[1],如比较成功的基于纹理的灰度共生矩阵方法^[2]、基于小波纹理的特征评价方法^[3~5]、基于灰度直方图的评价方法^[6,7]及基于颜

色空间稳定性的评价方法^[8],这些方法针对性较强,没有从图像整体上综合评价伪装效果的优劣,与人眼主观评价存在差距。

针对以上不足,本文从图像综合信息出发,运用图像的颜色(灰度)、纹理和统计特征,利用容限近集相关知识,找出伪装前后图像基于这些特征的所有容限近似类,得到一个全面的伪装评价指标——近似测量(tNM),tNM 值的大小直接反映伪装程度的

收稿日期: 2012-06-07; **收到修改稿日期**: 2012-06-29

作者简介: 王 贺(1983—),女,博士研究生,主要从事光学隐身评价方面的研究。E-mail: wjj19831983@126.com

导师简介: 白廷柱(1955—),男,工学博士,教授,主要从事微光与红外成像等方面的研究。E-mail: tzhbai@bit.edu.cn

(中国光学学会会员号:1000073)

高低。利用 tNM 对伪装图像进行综合评价的结果表明,该评价指标与人眼主观评价结果有很好的 consistency。

2 容限近集理论

2006 年,James^[9] 提出近集理论并于 2007 年正式定义。近集理论的产生源于粗糙集理论,其扩展了粗糙集理论中对象的不可分辨性。近集理论建立的思想在于两个不重叠对象集合彼此近似且包含有相同描述的对象,这种近似关系可以用不可分辨关系来定义。近集和粗糙集的区别在于近集不需要上、下近似集就可以完全描述;近集不关注单个集合的上、下近似集,而关注两个集合基于对象描述的近似(相似性)。近集理论的相关定义如下:

定义 1. 对象描述: 在 $\langle O, F \rangle$ (O 表示非空对象集, F 表示非空特征函数集) 感知系统中,若 $B \subseteq F$ 是一组特征函数,那么一个感知对象 $x \in O$ 的描述表示为如下特征矢量:

$$\Phi_B(x) = [\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_l(x), \dots, \phi_l(x)], \quad (1)$$

式中 l 是矢量 $\Phi_B(x)$ 的长度, $\phi_i(x)$ 是描述对象 $x \in O$ 的特征函数的特征值。

定义 2. 感知不可分辨关系与弱感知不可分辨关系^[10]: 在 $\langle O, F \rangle$ 感知系统中,若 $B \subseteq F$ 是一组特征

函数,则感知不可分辨关系可定义为

$$\sim_B = \{(x, y) \in O \times O \mid \forall \phi_i \in B, \phi_i(x) = \phi_i(y)\}.$$

弱不可分辨关系定义为

$$\simeq_{\phi_i} = \{(x, y) \in O \times O \mid \exists \phi_i \in B, \phi_i(x) = \phi_i(y)\}.$$

定义 3. 等价类和商集: 在 $\langle O, F \rangle$ 感知系统中, $x \in O$ 对于 $B \subseteq F$ 的等价类定义为

$$x_{\sim_B} = \{x' \in O \mid x' \sim_B x\}.$$

用不可分辨关系划分的等价类的全体称为商集,表示为

$$O_{\sim_B} = \{x_{\sim_B} \mid x \in O\}.$$

定义 4. 弱近似关系: 在 $\langle O, F \rangle$ 感知系统中,集合 $X, Y \subseteq O$. 集合 X 弱近似于集合 $Y (X \triangleright \triangleleft_F Y)$ 的充要条件是: 存在 $x \in X, y \in Y$, 使得在 $\phi_i \in F$ 中, 满足 $x \simeq_{B_i} y$.

定义 5. 近似关系: $\langle O, F \rangle$ 感知系统中,集合 $X, Y \subseteq O$. 集合 X 近似于集合 $Y (X \triangleright \triangleleft_F Y)$ 的充要条件是: 存在特征函数 $B_1, B_2 \subseteq F$ 和 $\phi_i \in F$, 当等价类 $A \in O_{\sim_{B_1}}$, 等价类 $B \in O_{\sim_{B_2}}$, 等价类 $C \in O_{\sim_{\phi_i}}$ 时, 有 $A \subseteq X, B \subseteq Y$ 和 $A, B \subseteq C$.

弱近似关系和近似关系可用图 1 形象描述。由图 1 可见,弱近似关系的成立条件只需要两集合中存在一个元素属于同一等价类即可,近似关系的成立条件则需要两集合中各有一个子集属于同一等价类,成立条件苛刻许多。

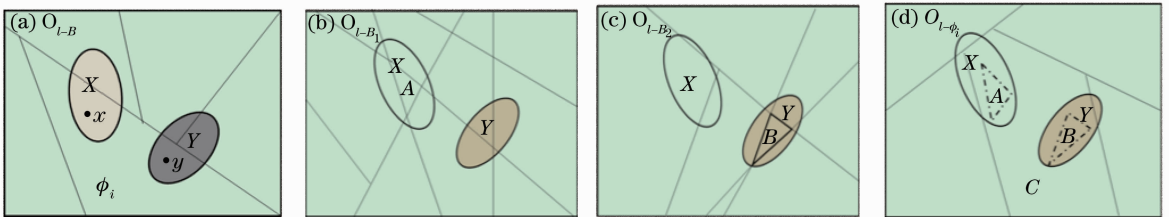


图 1 (a) 弱近似关系与 (b), (c), (d) 近似关系

Fig. 1 (a) Weak nearness relation and (b), (c), (d) nearness relation

容限空间是 Zmoeman 在研究人的视觉结构时,从一般拓扑空间理论出发建立起来的。引入容限空间主要考虑: 实践应用中对精确数据的处理往往只需要精确到某一精度范围,即一定的容限范围;有容限范围的研究能够很容易地与其他学科领域的研究相结合。

定义 6. 容限空间^[11]: 集合 X 上的一个容限 ϵ 是 X 上的一个二元关系,即 $\epsilon \subseteq X \times X$, 且满足,自反性: $\forall x \in X, (x, x) \in \epsilon$; 对称性: $\forall x, y \in X$, 若 $(x, y) \in \epsilon$, 则 $(y, x) \in \epsilon$. 这时, X 上具有容限 ϵ 的容限空间记为 (X, ϵ) . 若容限空间中的元素满足自反性、对称性,但不满足传递性,则该点值得注意。

定义 7. 感知容限关系和容限类^[12]: 在 $\langle O, F \rangle$ 感知系统中, $\epsilon \in R$, 对于任意的 $B \subseteq F$, 感知容限关系 $\simeq_{B, \epsilon}$ 定义为

$$\simeq_{B, \epsilon} = \{(x, y) \in O \times O: \|\Phi_B(x) - \Phi_B(y)\|_2 \leq \epsilon\}.$$

容限类 $X \subseteq O$ 定义为其中的任意两个元素满足 $x \simeq_{B, \epsilon} y$, 则 O 中所有的容限类记为 $H_{\simeq_B}(O)$. 这里 $\|\cdot\|_2$ 表示 L^2 范数, R 为实数集。为了简单起见,常把 $\simeq_{B, \epsilon}$ 写做 \simeq_B , 可以看出,感知容限关系是描述一对元素之间的关系,它区别于不可分辨关系之处是将 $\|\cdot\| = 0$ 用 $\|\cdot\| \leq \epsilon$ 代替。

定义 8. 容限近似关系与容限近集: 在 $\langle O, F \rangle$ 感知系统中, $X, Y \subseteq O, \epsilon \in R$. X, Y 满足容限近似关

系($X \underline{\triangleleft}_F Y$)的充要条件是:存在 $x \in X, y \in Y$, 使得 $B \subseteq F$ 满足 $x \cong_{B,Y}$ 。容限近集成立的充要条件是:当 $H_{\cong_B}(X)$ 和 $H_{\cong_B}(Y)$ 中存在 $A \in H_{\cong_B}(X), B \in H_{\cong_B}(Y)$ 满足 $A \underline{\triangleleft}_F B$ 。

定义 9. 近似测量: 在 $\langle O, F \rangle$ 感知系统中, $\epsilon \in R, B \subseteq F$ 。X, Y 是两个不重叠的集合并且有 $Z = X \cap Y$, 那么近似测量公式可表示为

$$f_{tNM_{\cong_B}}(X, Y) = \left(\sum_{C \in H_{\cong_B}(Z)} |C| \right)^{-1} \times \sum_{C \in H_{\cong_B}(Z)} |C| \frac{\min(|C \cap X|, |C \cap Y|)}{\max(|C \cap X|, |C \cap Y|)}, \quad (2)$$

式中 C 为集合 Z 中所有容限集 $H_{\cong_B}(Z)$ 中的任意子集。(2)式可用于计算两个容限近集的相似程度。当 $f_{tNM} = 0$ 时, 说明两近集相似程度为 0, 不是近集。 f_{tNM} 值越大, 近似程度越高。由 (2) 式可知, 计算

f_{tNM} 时需首先找出 X 和 Y 的并集 Z 的所有容限类 $H_{\cong_B}(Z)$ 。

3 容限近集理论评价伪装图像实例

评价流程图如图 2 所示。在伪装图像中找出待比较的伪装前与伪装后或不同伪装方式的目标区域, 并选取与目标区域接近的背景区域, 在兼顾评价速度和准确性的情况下, 根据经验一般选择 1~1.5 倍目标区域大小作为背景区域; 将这三部分图像分块得到不同数目的子图像, 子图像数量可以不一致, 但每块子图像的大小要一致, 这是为了保证计算的正确性; 对每一块子图像进行特征提取, 这里选择了具有代表性的几组特征, 其中包括颜色特征、灰度共生矩阵统计特征和局部二值模式(LBP)纹理特征。

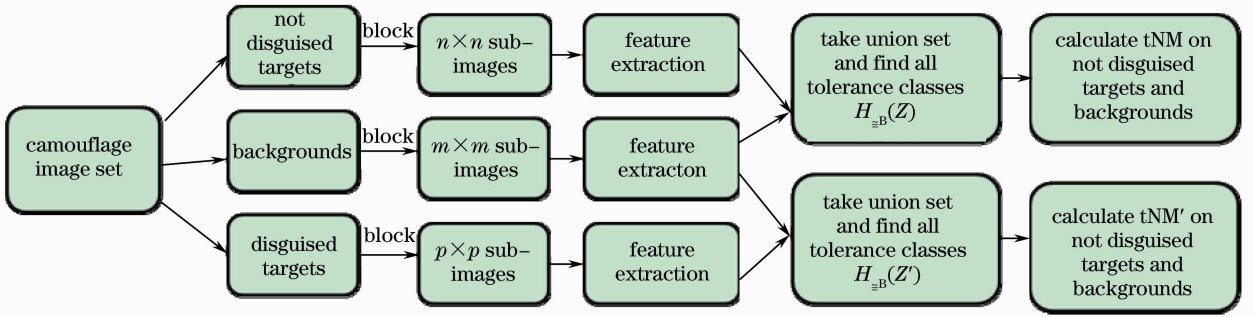


图 2 容限近集理论评价伪装图像流程图

Fig. 2 Camouflage evaluation flow chart using tolerance nearness sets

归一化颜色特征包括图像归一化的红、绿、蓝 3 个特征值:

$$R_N = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{\sum_{i=1}^m (R_i + G_i + B_i)}, \quad G_N = \frac{\sum_{i=1}^m G_i}{\sum_{i=1}^m (R_i + G_i + B_i)}, \quad B_N = \frac{\sum_{i=1}^m B_i}{\sum_{i=1}^m (R_i + G_i + B_i)}. \quad (3)$$

式中 R_i, G_i 和 B_i 分别为各子图像中每一像素的红、绿、蓝色值。灰度共生矩阵统计特征包括灰度共生矩阵对比度和灰度共生矩阵熵 2 个特征值:

$$C_{g_{lcm}} = \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} (i-j)^2 p_{ij}, \quad E_{g_{lcm}} = - \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} (p_{ij} \lg p_{ij}). \quad (4)$$

LBP 纹理特征包括纹理熵、纹理能量和纹理均值 3 个特征值:

$$E_{lbp} = - \sum_{i=1}^m (f_{lbp_i} \times \lg f_{lbp_i}), \quad U_{lbp} = \sum_{i=1}^m f_{lbp_i}^2, \quad S_{lbp} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m f_{lbp_i}^2}}{m}. \quad (5)$$

式中 m 为各子图像中的总像素数, $N_g - 1$ 为子图像中的灰度级数, 具体的灰度共生矩阵 g_{lcm} 和 LBP 计算见文献[2, 13]。本文对彩色图像的伪装评价采用以上 8 个特征值描述每一个子图像, 对灰度图像伪装评价时将颜色特征的 3 个特征值用灰度平均值这

1 个值代替, 即灰度子图像用 6 个特征值描述。

找出所有容限类集 $H_{\cong_B}(Z)$ 的过程是研究工作的重点, 由于容限空间不满足传递性, 因而同一容限类的子图像中任意两个子图都必须满足容限感知关系, 这就是说, 在判断一个子图像是否属于某一容限

类时,要计算该子图与已知容限类中其他所有子图的容限感知关系,这是一个反复计算的过程。同一个子图可能属于两个或多个容限类,这是被允许的。计算出所有的容限类集后,根据定义 9 中给出的公式就可得到伪装目标与背景或未伪装目标与背景的近似测量值,近似测量值的大小直接反映伪装效果。

为了能更好的反映 tNM 作为伪装评价指标的优越性,引入被广泛使用的豪斯多夫距离(tHD)作为对比,tHD 定义为

$$d_H(X,Y) = \max\{\sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x,y), \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(x,y)\},$$
 在容限近集计算中,tHD 可改写成

$$f_{tHD \geq B}(X,Y) = \left(\sum_{C \in H_{\geq B}(Z)} |C| \right)^{-1} \cdot \sum_{C \in H_{\geq B}(Z)} |C| [\sqrt{l} - d_H(C \cap X, C \cap Y)], \quad (6)$$

式中 l 为子图像特征值的个数。与 f_{tNM} 不同的是, f_{tHD} 为距离,所以 f_{tHD} 值越小,表示两集合的相似度越高,伪装效果越好。

中的彩色伪装图,图 3(d)和图 3(e)是坦克在丛林背景中覆盖伪装网前后灰度伪装图^[14],图 3(f)是丛林背景车辆伪装与未伪装灰度图^[15]。分别计算各图的 tNM 与 tHD,如表 1 所示。

图 3(a)~(c)是两种伪装迷彩在不同陆地背景

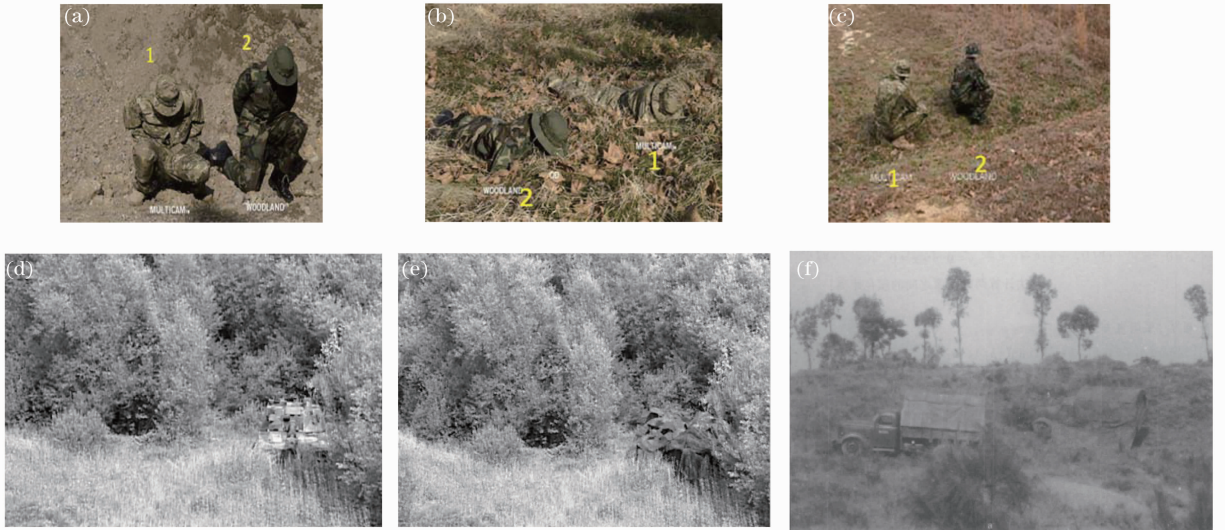


图 3 几种不同方式的伪装图像

Fig. 3 Different kinds of camouflaged images

表 1 图 3 中各图 tNM 与 tHD 值比较

Table 1 tNM and tHD of Fig. 3

	Fig. 3(a)			Fig. 3(b)			Fig. 3(c)		
	1	2	Camouflage sort	1	2	Camouflage sort	1	2	Camouflage sort
tNM	0.3767	0.2189	1 is better than 2	0.1267	0.1066	1 is better than 2	0.4499	0.3936	1 is better than 2
tHD	2.5909	2.6416	1 is better than 2	2.7481	2.7186	1 is worse than 2	2.6467	2.6189	1 is worse than 2
Subjective sort	1 is better than 2			1 is better than 2			1 is better than 2		
	Fig. 3(d)		Camouflage sort	Fig. 3(f)					
	Not disguised tank	Disguised tank		Not disguised truck 1	Disguised truck 2	Camouflage sort			
tNM	0.2922	0.4004	(d is worse than e)	0.2329	0.4341	1 is worse than 2			
tHD	2.2198	2.2432	(d is better than e)	2.3078	2.1929	1 is worse than 2			
Subjective sort	d is worse than e			1 is worse than 2					

由表 1 可以看出,图 3(a)~(f)图像 tNM 值的大小均正确地反映了伪装近似程度的好坏(这里的正确反映指与人眼主观观测相一致),对于 tHD 值,只有图 3(a)和图 3(f)能够与人眼观测保持一致,其余图像正好相反,证明了 tNM 作为评价伪装效果的指标优于 tHD,能与人眼主观评价保持很好的一致性。

4 参数选择对评价效果影响分析

需要讨论的参数为子图像分块数 n 和感知容限关系中容差 ϵ 。在对图 3 分析的基础上,发现各图分块数 n 与容差 ϵ 对 tNM 的影响基本相同,以图 3(b)和图 3(f)为例,分析 n 及 ϵ 对评价效果的影响。图 4(a)、(c)分别是图 3(b)、(f)在 $\epsilon=0.5$ 时 tNM 值随子图尺寸变化曲线,图 4(b)、(d)分别是图 3(b)、(f)在 $n=15$ 和 $n=9$ 时 tNM 随 ϵ 变化曲线

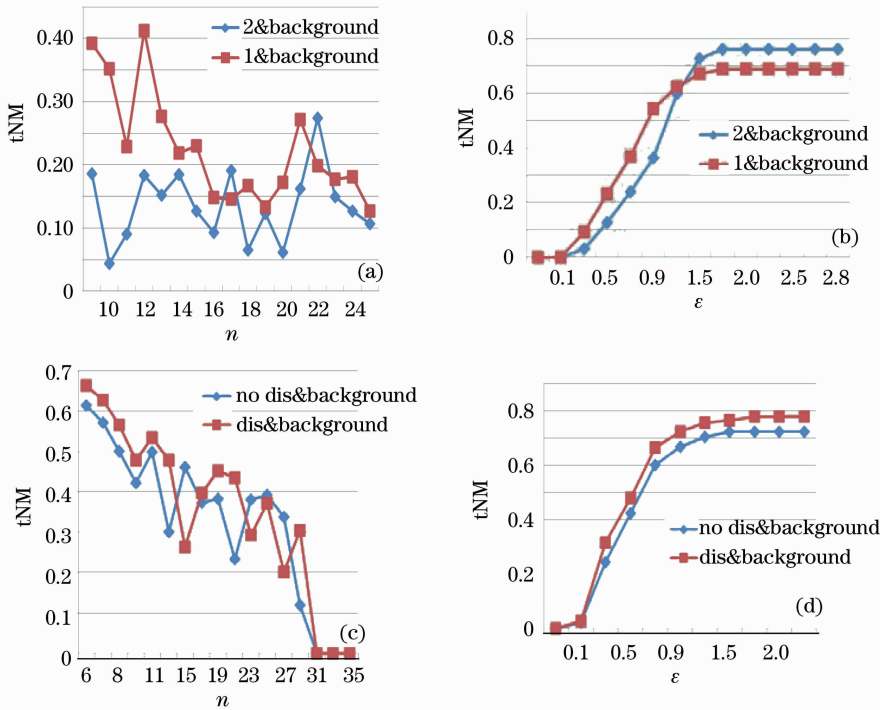


图 4 不同参数选择对近似测量值 tNM 的影响

Fig. 4 Effect of different parameters on tNM

5 结 论

提出一种新型的基于容限近集理论的评价伪装图像伪装程度的综合评价方法。该方法综合运用伪装图像的各方面特征,可全面评价伪装图像的伪装程度。此外,该方法对基于光学伪装的彩色及灰度图像均能够做出有效、客观和定量的评价。这里提出的 tNM 评价指标不仅能很好的代替人眼主观评价结果,还能将这一评价结果量化表示,优于较常见

的 tHD 评价指标。由图 4 看出,tNM 值随子图像分块数 n 的增加呈现递减的趋势,即子图像块数越多,tNM 值越小,这是因为分块数越多,每个子图像素数越少,划分容限类时目标与背景属于同一容限类的概率越小,tNM 计算公式中分子取 0 的情况变多,使 tNM 的值整体变小。经实验验证,子图像分块数取 30 左右像素数时能得到很好的实验效果。tNM 值随 ϵ 值增大呈指数增长,当 ϵ 值增加到一定程度时,tNM 值趋于饱和。这是因为增加 ϵ 值,相当于放宽了各子图像属于同一容限集的条件,使更多目标和背景的子图像被划分到同一容限集中,使 tNM 值变大。 ϵ 的选择应在一定范围内,文献[12]中提出 ϵ 应选择小于 \sqrt{l} 的值,经实验分析,进一步将这一范围缩小到 $0.2 \sim \sqrt{l-3}/2$ 。

的 tHD 评价指标。

参 考 文 献

- 1 Hu Maohai. Algorithm of object recognition based on similarity measurement of correlation output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0409002
胡茂海. 基于相关输出相似性度量的目标识别算法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0409002
- 2 S. Jeffrey. Infrared target model validation using gray-level co-occurrence matrices[C]. *SPIE*, 1999, **3699**: 197~206
- 3 Zhang Xuewu, Ding Yanqiong, Yan Ping. Vision inspection of

- metal surface defects based on infrared imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312004
- 张学武, 丁燕琼, 闫 萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312004
- 4 Zhu Huanhuan, Du Sidan. Camouflage assessment based on wavelet texture characteristics[J]. *Computer Engineering*, 2008, **34**(16): 227~229
- 朱欢欢, 都思丹. 基于小波纹理特征的迷彩伪装评价[J]. *计算机工程*, 2008, **34**(16): 227~229
- 5 Zhang Su, Wang Wensheng. Optical correlation recognition of the moving target in cluttered background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0107001
- 张 肃, 王文生. 复杂背景下运动目标的光学相关识别[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0107001
- 6 Guo Haitao, Tian Tan, Wang Lianyu *et al.*. Image segmentation using the maximum entropy of the two-dimensional bound histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 506~509
- 郭海涛, 田 坦, 王连玉 等. 利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 506~509
- 7 Wang Dong, Lü Xuliang, Xu Weidong *et al.*. Camouflage application models with pixel frequency analysis [J]. *J. PLA University of Science and Technology*, 2004, **5**(3): 74~77
- 汪 东, 吕绪良, 许卫东 等. 基于灰度直方图分析技术的伪装应用模型[J]. *解放军理工大学学报*, 2004, **5**(3): 74~77
- 8 Wang Hao, Zeng Zhaoyang, Lan Yongjie *et al.*. Stability of LMS color space on camouflage evaluation [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(5): 10~12
- 王 浩, 曾朝阳, 兰永杰 等. LMS 颜色空间稳定性在伪装评价中的应用[J]. *光电技术应用*, 2007, **22**(5): 10~12
- 9 J. F. Peter, A. skowron, J. Stepaniuk. Nearness in approximation spaces[C]. Proc. CS&P'06 Workshop. 434~445
- 10 P. James, W. Piotr. Foundations of near sets [J]. *Information Science*, 2009, **179**: 3091~3109
- 11 Mao Guojun, Qian Tao, Lü Jian'gang *et al.*. Tolerance spaces theory expansion and application in artificia neural network[J]. *Computer Science*, 1994, **21**(5): 27~30
- 毛国君, 钱 毅, 吕建刚 等. 容限空间理论的扩展及其在人工神经网络中的应用[J]. *计算机科学*, 1994, **21**(5): 27~30
- 12 H. Christopher, P. James. Near set evaluation and recognition (NEAR) system V3. 0; UM CI laboratory technical report[R]. Canada; Computational Intelligence Laboratory, 2012
- 13 Jin Hongliang, Liu Qingshan *et al.*. Face detection using improved LBP under bayesian framework [C]. Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics, Hong Kong; IEEE, 2004
- 14 S. Georg, W. Andreas, B. Horst. Minimum description length principle applied to camouflage assessment [C]. *SPIE*, 2001, **4370**: 50~59
- 15 Chen Hongye, Zeng Zhaoyang, Shen Junping *et al.*. Application of image similarity on camouflage evaluation [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, **21**(5): 28~30
- 陈宏烨, 曾朝阳, 沈均平等. 图像相似度在伪装评价中的应用[J]. *光电技术应用*, 2006, **21**(5): 28~30

栏目编辑: 李文喆