

一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法

郭彤 华文深 刘恂 刘晓光 崔子浩

机械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

摘要 为充分利用高光谱成像技术提供的丰富的光谱信息和纹理信息,对光学伪装效果进行综合评价,提出了一种结合光谱曲线形状相似度、光谱欧氏距离以及纹理欧氏距离的伪装效果综合评价方法。利用绝对关联度、欧氏距离和灰度共生矩阵分别对三类特征进行量化,从形状测度和距离测度两方面综合考量光谱信息和空间纹理信息,求得综合测度。该方法在理论上更加缜密,实验表明综合测度有较好的稳健性,避免了单一测度的不确定性,对伪装器材的设计和使用具有指导作用。

关键词 图像处理; 高光谱; 相似性测度; 伪装评价; 绝对关联度; 灰度共生矩阵; 欧氏距离

中图分类号 E951.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.101002

Comprehensive Evaluation of Optical Camouflage Effect Based on Hyperspectra

Guo Tong Hua Wenshen Liu Xun Liu Xiaoguang Cui Zihao

Department of Electronic and Optical Engineering, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

Abstract To fully utilize abundant spectral and texture information in hyperspectra, a method to comprehensively evaluate the optical camouflage effect is proposed. The method combines the similarity of spectral curve shape, the spectral Euclid distance and the texture Euclid distance. The three features are quantified by the absolute correlation degree, Euclid distance and gray level co-occurrence matrix, respectively. The spectral and the texture information are taken into consideration in terms of the shape measure and the distance measure to obtain a comprehensive measure. This method is rigorous in theory, and it is experimentally proved to be robust and avoid the uncertainty of single measure. It is instructive for camouflage material design and usage.

Key words image processing; hyperspectra; similarity measure; camouflage evaluation; absolute correlation degree; gray level co-occurrence matrix; Euclid distance

OCIS codes 100.3008; 110.4234; 280.4991

1 引言

近年来高光谱成像侦察手段迅猛发展,该技术将成像技术和光谱技术有机结合在一起,同时获得探测对象的二维空间几何信息和一维光谱信息,构成三维数据立方,提供连续的窄波段图像数据,已成为现代战场上反伪装的重要手段之一^[1-2]。常规的基于高光谱的光学伪装效果评价方法多采用光谱信息的匹配测度,主要分为两类,一类基于距离,另一类基于形状^[3-4]。基于距离的方法是测定目标光谱与背景光谱之间的距离,如马氏距离测度^[5]和欧氏距离测度^[6-7]等。基于形状的方法是测定目标光谱与背景光谱之间形状的相似度,例如光谱角度匹配^[8]和交叉相关光谱匹配^[5]等。空间几何信息包含目标和背景的纹理信息,纹理分析方法一般分为结构分析法、统计方法、纹理模型法和信号处理方法4类^[9]。随着高光谱成像仪分辨率的提高,空间信息也应该纳入伪装评价指标中。

收稿日期: 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-05-26; **网络出版日期:** 2016-09-24

作者简介: 郭彤(1992—),男,硕士研究生,主要从事光学图像处理方面的研究。E-mail: 452619787@qq.com

导师简介: 华文深(1967—),男,博士,副教授,主要从事光电检测与光信息处理方面的研究。

E-mail: huawensh@126.com

本文根据高光谱图像的特点,针对高光谱侦测技术,提出一种综合考量光谱曲线形状、光谱欧氏距离和地物纹理欧氏距离的相似性度量方法,以期更加有效地分析伪装目标与背景之间的差距,寻找效果更佳的伪装方式。

2 基本原理

假设高光谱图像共有 k 个波段, m 种伪装目标, n 种背景环境,目标光谱的数列为 $X_i = \{x_i(s), s=1, 2, \dots, k\}, i=1, 2, \dots, m$,背景光谱的数列为 $X_j = \{x_j(s), s=1, 2, \dots, k\}, j=1, 2, \dots, n$ 。

2.1 光谱曲线形状

光谱的曲线形状相似与否,可以通过绝对关联度来进行判断^[10],方法如下。

1) 对目标光谱 Y_i 和背景光谱 Y_j 分别进行初值化,使光谱之间具有可比性。

$$Y_i = \left\{ \frac{x_i(s)}{x_i(1)}, s=1, 2, \dots, k \right\} = \{y_i(s)\}, \quad (1)$$

$$Y_j = \left\{ \frac{x_j(s)}{x_j(1)}, s=1, 2, \dots, k \right\} = \{y_j(s)\}. \quad (2)$$

2) 对 Y_i 和 Y_j 进行一阶微分,找到目标光谱和背景光谱曲线上各点的斜率:

$$\partial_i(s+1) = y_i(s+1) - y_i(s), \quad (3)$$

$$\partial_j(s+1) = y_j(s+1) - y_j(s), \quad (4)$$

式中 $s=1, 2, \dots, k-1$ 。引入关联系数

$$\xi(s+1) = 1 / [1 + |\partial_i(s+1) - \partial_j(s+1)|]. \quad (5)$$

3) 计算绝对关联度

$$r_{i,j} = \frac{1}{k-1} \sum_{s=2}^k \xi(s). \quad (6)$$

绝对关联度通过比较曲线上各点斜率的相近程度来判定两条曲线的几何形状是否相似。该方法的优点是去除了光谱矢量大小对形状判断的影响。同时,关联度的大小由两条参与比较的光谱曲线唯一确定,具有可比性和对称性^[11-12]。关联度越大,说明两条曲线的形状越相似;关联度越小,则光谱曲线形状相差越大。

2.2 光谱欧氏距离

光谱矢量是由地物在各波段上的响应值组成的矢量,不同地物之间的光谱差异通常使用光谱矢量间的几何距离表示^[13],利用欧氏距离表征光谱矢量的差异:

$$D_{s,i,j} = \sqrt{\sum_{s=1}^k [x_i(s) - x_j(s)]^2}. \quad (7)$$

直接使用欧氏距离量化目标和背景之间的光谱矢量距离,可以简单直观地反映目标与背景之间的光谱相似性。从光谱矢量的角度对伪装效果进行评价,光谱欧氏距离越小,说明目标与背景的光谱越相似。

2.3 地物纹理矢量距离

高光谱成像技术还能提供大量的空间信息,利用空间信息可以考察目标与背景的纹理差距^[14],体现空间纹理的相似性。首先利用主成分分析提取高光谱图像的主要信息,获得含有原始图像集 80% 以上信息的第一主成分,然后使用灰度共生矩阵统计目标和背景的纹理特征。灰度共生矩阵是一种常用的利用统计学描述纹理的方法,统计从像素灰度 u 经过位置关系 $d = (D_x, D_y)$ 到达像素灰度 v 的概率^[15-16],用 $P(u, v)$ ($u, v=0, 1, \dots, L-1$) 表示,其中 L 为灰度级。灰度共生矩阵的像素对如图 1 所示。

当方向 θ 和像素间距离 d 确定以后,可以产生一个灰度共生矩阵,形式为

$$P_{\theta,d} = \begin{bmatrix} P_{\theta,d}(0,0) & P_{\theta,d}(0,1) & \cdots & P_{\theta,d}(0,L-1) \\ P_{\theta,d}(1,0) & P_{\theta,d}(1,1) & \cdots & P_{\theta,d}(1,L-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{\theta,d}(L-1,0) & P_{\theta,d}(L-1,1) & \cdots & P_{\theta,d}(L-1,L-1) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

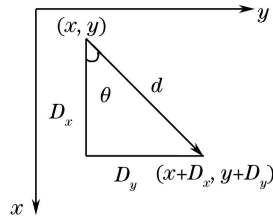


图 1 灰度共生矩阵的像素对

Fig. 1 Pair pixels of gray level co-occurrence matrix

为了更好地利用灰度共生矩阵描述图像纹理信息,将各个元素 $P_{\theta,d}(u, \nu)$ 除以共生矩阵的元素之和,得到归一化值 $\hat{P}_{\theta,d}(u, \nu)$, 获取二次统计量。常用的表达纹理特征的参量有 8 个,选取其中 4 个不相关的特征参量,即二阶矩、熵、对比度和相关性^[17-18]。利用这 4 个特征表示地物的纹理特征信息。二阶矩 A 、熵 E 、对比度 I 和相关性 C 分别表示为

$$A = \sum_{u=0}^{L-1} \sum_{\nu=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}^2(u, \nu), \quad (9)$$

$$E = - \sum_{u=0}^{L-1} \sum_{\nu=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}(u, \nu) \ln [\hat{P}_{\theta,d}(u, \nu)], \quad (10)$$

$$I = \sum_{u=0}^{L-1} \sum_{\nu=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}(u, \nu) (u - \nu)^2, \quad (11)$$

$$C = \frac{\sum_{u=0}^{L-1} \sum_{\nu=0}^{L-1} u\nu \hat{P}_{\theta,d}(u, \nu) - \mu_1 \mu_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2}, \quad (12)$$

式中

$$\mu_1 = \sum_{u=0}^{L-1} u \sum_{\nu=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}^2(u, \nu), \quad (13)$$

$$\mu_2 = \sum_{\nu=0}^{L-1} \nu \sum_{u=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}^2(u, \nu), \quad (14)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{u=0}^{L-1} (u - \mu_1)^2 \sum_{\nu=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}^2(u, \nu), \quad (15)$$

$$\sigma_2^2 = \sum_{\nu=0}^{L-1} (\nu - \mu_2)^2 \sum_{u=0}^{L-1} \hat{P}_{\theta,d}^2(u, \nu). \quad (16)$$

分别从 0° 、 45° 、 90° 和 135° 4 个方向分析地物的纹理特征,因此每种地物都可得到一个由 16 个元素组成的代表地物纹理信息的矢量,

$$\mathbf{Q}_i = [A_{1,i}, A_{2,i}, A_{3,i}, A_{4,i}, E_{1,i}, E_{2,i}, E_{3,i}, E_{4,i}, I_{1,i}, I_{2,i}, I_{3,i}, I_{4,i}, C_{1,i}, C_{2,i}, C_{3,i}, C_{4,i}], \quad (17)$$

$$\mathbf{Q}_j = [A_{1,j}, A_{2,j}, A_{3,j}, A_{4,j}, E_{1,j}, E_{2,j}, E_{3,j}, E_{4,j}, I_{1,j}, I_{2,j}, I_{3,j}, I_{4,j}, C_{1,j}, C_{2,j}, C_{3,j}, C_{4,j}]. \quad (18)$$

同样使用欧氏距离表示各地物之间纹理信息的差距,

$$D_{T,i,j} = \sqrt{\sum_{t=1}^{16} [\mathbf{Q}_i(t) - \mathbf{Q}_j(t)]^2}. \quad (19)$$

欧氏距离越大,两地物之间的纹理差距越大,欧氏距离越小,则地物之间的纹理越相似。

2.4 综合伪装评价

为了充分利用高光谱成像仪提供的信息,同时考虑光谱曲线形状、光谱欧氏距离、空间纹理欧氏距离三个方面,综合考量地物之间的相似度,提出类似的综合测度公式^[3-4,13]:

$$T_{SS} = \sqrt{(1 - r_{i,j})^2 + d_{S,i,j}^2 + d_{T,i,j}^2}, \quad (20)$$

$$d_{S,i,j} = (D_{S,i,j} - w) / (W - w), \quad (21)$$

$$d_{T,i,j} = (D_{T,i,j} - z) / (Z - z), \quad (22)$$

式中 W 和 w 分别为光谱矢量差异 $D_{S,i,j}$ 的最大值和最小值, Z 和 z 分别为地物之间纹理差距 $D_{T,i,j}$ 的最大值和最小值, $d_{S,i,j}$ 和 $d_{T,i,j}$ 的取值范围均为 $[0, 1]$ 。因此 T_{SS} 在 $0 \sim \sqrt{3}$ 之间, 该数值越小, 代表两个地物越相似。

3 实验结果与分析

3.1 实验一

实验布置如图 2 所示。共设置 5 个伪装目标, 其中 A 为某型绿色外套, B 为某型迷彩服, C 为某型迷彩雨衣, D 为翠绿色塑料草皮, E 为军绿色塑料草皮。分别与树丛背景 F 和草地背景 G 进行对比, 量化分析伪装目标与背景的相似性。

实验观测天顶角为 55° , 观测距离为 54 m, 太阳天顶角为 30° , 相对方位角为 75° , 天气晴朗。使用光谱范围为 449~801 nm 的高光谱成像仪进行采样, 采用 65536(16-bit) 灰度级, 步长取 4 nm, 波段宽度为 3.9 nm, 共获取 89 个波段的图像(即 $k=89$)。伪装目标和背景的光谱曲线如图 3 所示。



图 2 实验场景图一

Fig. 2 Experiment scene No. 1

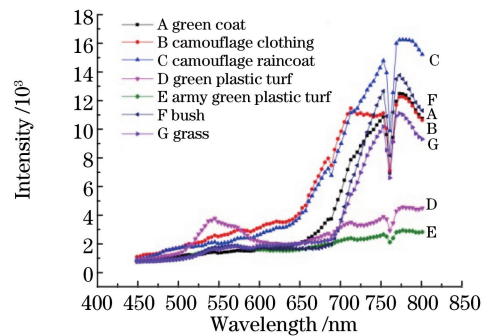


图 3 伪装目标和背景的光谱曲线对比图

Fig. 3 Comparison of the spectral curves for camouflage targets and backgrounds

利用绝对关联度算法分析各伪装目标与背景光谱曲线形状的差异, 计算结果如表 1 所示。

表 1 目标与背景绝对关联度比较

Table 1 Comparison of absolute correlation degree for camouflage targets and backgrounds

	A	B	C	D	E
F	0.8875	0.8279	0.8410	0.8158	0.8427
G	0.9092	0.8609	0.8687	0.8330	0.8641

由表 1 可以看出, 从光谱曲线形状来看, 选取的伪装目标均与草地背景更加相似, 与树丛背景相对差距较大。针对树丛背景, 伪装效果由好到差依次为 A、E、C、B、D; 针对草地背景时, 伪装效果由好到差依次为 A、C、E、B、D。通过图 3 也可以看出, A 类伪装目标的光谱形状与背景最接近, 而 D 类伪装目标的光谱形状在第 20~30 波段以及第 60~89 波段有明显差异。

利用欧氏距离比较目标与背景的光谱矢量大小, 为方便后续计算, 对其进行归一化处理, 结果如表 2 所示。

表 2 目标与背景光谱欧氏距离比较

Table 2 Comparison of spectral Euclid distance for camouflage targets and backgrounds

	A	B	C	D	E
F	0	0.4838	0.4919	0.8332	1
G	0.0297	0.5007	0.6754	0.5440	0.7057

由表 2 可以看出, 针对树丛背景, 伪装效果由好到差依次为 A、B、C、D、E; 针对草地背景时, 伪装效果由好到差依次为 A、B、D、C、E。通过图 3 也可以看出, A 类伪装目标与背景的灰度值最接近, B 类伪装目标在 70~89 波段更接近背景, 其他三类目标的灰度值分别在不同的波段与背景差距较大。

利用灰度共生矩阵的二次统计值构成的矢量距离,分析伪装目标与背景之间的纹理差异,结果如表 3 所示。

表 3 目标与背景纹理欧氏距离比较

Table 3 Comparison of texture Euclid distance for camouflage targets and backgrounds

	A	B	C	D	E
F	0.0476	0.0964	0	0.0150	1
G	0.0328	0.3107	0.2222	0.0667	0.8220

从纹理角度来看,针对树丛背景,伪装效果由好到差依次为 C、D、A、B、E,C 类目标最适合在树丛背景中进行伪装;而针对草地背景时,伪装效果由好到差依次为 A、D、C、B、E,A 类伪装与草地背景纹理最相似。5 类目标中,E 类目标的纹理与背景相似度最低。

针对同样的背景,使用不同的单一测度进行伪装效果的评判得到的结果差异较大,说明单一测度是不完善的。应采用光谱和空间纹理的多个测度进行综合分析,寻求伪装器材最适合的背景环境。利用综合测度 T_{SS} 对伪装效果进行综合评定,结果如表 4 所示。

表 4 目标伪装效果的综合测度

Table 4 Comprehensive evaluation of camouflage effect of targets

	A	B	C	D	E
F	0.0075	0.1365	0.1336	0.3642	1.0124
G	0.0051	0.1833	0.2614	0.1642	0.5961

从表 4 可以看出,A 类伪装针对草地和树丛都是最佳的伪装方式;B、C 两类伪装与树丛背景更加相似;D、E 两类伪装在草地背景下的伪装效果更好。通过实验可以看出,面对高光谱的检测,针对树丛背景,伪装效果由好到差依次为 A、C、B、D、E;针对草地背景时,伪装效果由好到差依次为 A、D、B、C、E。

3.2 实验二

为了验证综合测度算法的稳健性,进行对比实验二。依然设置 5 个伪装目标,为了方便对比,只将实验一中的 D 类目标更换为某型绿色迷彩服,其他伪装目标不变。光谱范围等实验参数不变,实验场景图如图 4 所示。



图 4 实验场景图二

Fig. 4 Experiment scene No. 2

对获取的实验数据进行处理,目标与背景的绝对关联度比较、光谱欧氏距离比较、纹理欧氏距离比较和目标伪装效果综合评定结果分别如表 5~8 所示。

表 5 目标与背景绝对关联度比较

Table 5 Comparison of absolute correlation degree

	A	B	C	D	E
F	0.9235	0.8937	0.9063	0.8746	0.9086
G	0.9425	0.9333	0.8964	0.9196	0.8913

表 6 目标与背景光谱欧氏距离比较

Table 6 Comparison of spectral Euclid distance

	A	B	C	D	E
F	0.1266	0.1712	0.0958	1	0.5407
G	0	0.0288	0.4501	0.4456	0.8171

表 7 目标与背景纹理欧氏距离比较
Table 7 Comparison of texture Euclid distance

	A	B	C	D	E
F	0.0583	0.2570	0.2032	1	0.1296
G	0	0.4347	0.3825	0.8101	0.2773

表 8 目标伪装效果的综合评定
Table 8 Comprehensive evaluation of camouflage effect of targets

	A	B	C	D	E
F	0.0126	0.0533	0.0296	1.0079	0.1588
G	0.0017	0.0971	0.1798	0.4306	0.3782

由表 5 可以看出,从光谱曲线形状来看,针对树丛背景,伪装效果由好到差依次为 A、D、C、B、E;针对草地背景时,伪装效果由好到差依次为 A、B、E、C、D。由表 6 可以看出,从光谱矢量来看,针对树丛背景,伪装效果由好到差依次为 C、A、B、D、E;针对草地背景时,伪装效果由好到差依次为 A、B、E、C、D。由表 7 可以看出,从纹理角度来看,针对树丛背景,伪装效果由好到差依次为 A、D、C、B、E,而针对草地背景时,伪装效果由好到差依次为 A、D、C、B、E。由表 7 可以看出,面对高光谱的检测,针对树丛背景,伪装效果由好到差依次为 A、C、B、D、E;针对草地背景,伪装效果由好到差依次为 A、B、C、D、E。

3.3 实验分析

对比两个实验的结果发现,实验环境的变化对单一测度是有影响的。实验二中通过单一测度显示的伪装效果排名与实验一有较大不同。而采用综合测度对伪装效果进行评估时,两组实验中共有的 A、B、C、E 这 4 类目标的排名没有发生变化,充分证明综合伪装效果评价有较好的稳健性及可参考性。

伪装效果评价结果与人眼直接识别有一定的差距,其主要原因是人眼视觉最敏感的波段在 550 nm 附近,在 685~801 nm 波段内,人眼不是十分敏感^[19]。高光谱仪使用的是硅探测器,探测器和人眼响应机制有很大不同,在近红外波段更加敏感,因此在 685~801 nm 波段内基于探测器的伪装评价结果与人眼主观评价结果有所不同(图 3)。

4 结 论

伪装器材在不同的测度上有各自的优势,利用单一测度进行伪装效果评价具有很大的不确定性。同时,由于背景变化,单一测度的结果也会随之发生变化,稳定性较差。因此,应该从多角度对伪装效果进行评价。采用提出的综合光谱曲线形状、光谱欧氏距离和纹理欧氏距离的光学伪装效果评价方法,能够充分利用高光谱成像的丰富信息,理论上更加缜密,评价结果更加完善。两组实验中共用目标的伪装效果排名一致,体现出综合测度具有较好的稳健性和可靠性,对伪装材料的设计和使用具有重要的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- 1 Ma Yongping, Zhang Wei, Liu Dongxu. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets[J]. Aerospace Shanghai, 2012, 29(1): 37-40.
麻永平, 张 炜, 刘东旭. 高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析[J]. 上海航天, 2012, 29(1): 37-40.
- 2 Xun Lina, Fang Yonghua. Target detection in hyperspectral images using projection pursuit[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(10): 1584-1588.
寻丽娜, 方勇华. 基于投影寻踪的高光谱图像目标检测算法[J]. 光子学报, 2006, 35(10): 1584-1588.
- 3 Pu Ruiliang, Gong Peng. Hyperspectral remote sensing and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 4 Granahan J C, Sweet J N. An evaluation of atmospheric correction techniques using the spectral similarity scale[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001: 2022-2024.
- 5 Zhang Liangpei, Zhang Lifu. Hyperspectral remote sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011.
张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 北京: 测绘出版社, 2011.

- 6 Hua Wenshen, Yang Jia, Liu Xun, *et al.* Camouflage assessment based on hyperspectral characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 964-967.
华文深, 杨佳, 刘恂, 等. 基于高光谱特征的迷彩伪装评价[J]. *应用光学*, 2013, 34(6): 964-967.
- 7 Cao Pengfei, Li Hongning, Luo Yanlin, *et al.* Selection of feature bands for *Phaseolus vulgaris* leaves based on multi-spectral imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 011101.
曹鹏飞, 李宏宁, 罗艳琳, 等. 基于多光谱成像选取四季豆叶片的特征波段[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 011101.
- 8 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.
- 9 Ma Li, Fan Yingle. Texture image analysis[M]. Beijing: Science Press, 2009.
马莉, 范影乐. *纹理图像分析*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 10 Mei Zhenguo. The concept and computation method of grey absolute correlation degree[J]. *Systems Engineering*, 1992, 10(5): 43-44.
梅振国. 灰色绝对关联度及其计算方法[J]. *系统工程*, 1992, 10(5): 43-44.
- 11 Gao Yongli, Xue Wenge. Studies of the absolute correlation degree image border detecting method based on grey system theory[J]. *Journal of Chuxiong Normal University*, 2009, 24(6): 13-16.
高永丽, 薛文格. 基于灰色系统理论的绝对关联度图像边缘检测方法研究[J]. *楚雄师范学院学报*, 2009, 24(6): 13-16.
- 12 Lü Xuliang, Jia Qi, Rong Xianhui, *et al.* Application of degree of grey incidence on similarity of spectral curves[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 12(5): 496-500.
吕绪良, 贾其, 荣先辉, 等. 灰色关联度在光谱曲线相似度分析中的应用[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(5): 496-500.
- 13 Kong Xiangbing, Shu Ning, Tao Jianbin, *et al.* A new spectral similarity measure based on multiple features integration[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(8): 2166-2170.
孔祥兵, 舒宁, 陶建斌, 等. 一种基于多特征融合的新型光谱相似性测度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(8): 2166-2170.
- 14 Wang Zengmao, Du Bo, Zhang Liangpei, *et al.* Based on texture feature and extend morphological profile fusion for hyperspectral image classification[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0810002.
王增茂, 杜博, 张良培, 等. 基于纹理特征和形态学特征融合的高光谱影像分类法[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0810002.
- 15 Li Jing, Yang Yuqian, Shen Wei, *et al.* Research on fabric texture based on gray level co-occurrence matrix[J]. *Advanced Textile Technology*, 2013(3): 12-16.
李静, 杨玉倩, 沈伟, 等. 基于灰度共生矩阵的织物纹理研究[J]. *现代纺织技术*, 2013(3): 12-16.
- 16 Wang Zhishe, Yang Fengbao, Chen Lei, *et al.* SAR and visible image enhanced fusion based on texture segmentation and top-hat transformation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1010002.
王志社, 杨风暴, 陈磊, 等. 基于纹理分割和 Top-Hat 变换的合成孔径雷达与可见光图像增强融合[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1010002.
- 17 Li Lulu. Texture image segmentation is based on gray level co-occurrence matrix and MRF[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2013.
李陆陆. 基于灰度共生矩阵和 MRF 的纹理图像分割[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- 18 Yan Xin, Dong Junqing, Liu Weidong, *et al.* Research on texture characteristics analysis of ancient glaze optical coherence tomographic image[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0508008.
严鑫, 董俊卿, 刘卫东, 等. 古代瓷釉光学相干层析图像的纹理特征分析研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508008.
- 19 Tan Jichun. Night vision technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
谭吉春. *夜视技术*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.