



王晓,刘木华,张扬,等.基于偏振纹理特征的枫叶营养诊断方法研究[J].江西农业大学学报,2023,45(1):202-209.
WANG X,LIU M H,ZHANG Y,et al.Study on nutritional diagnosis method of maple leaf based on polarization texture feature[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(1):202-209.

基于偏振纹理特征的枫叶营养诊断方法研究

王 晓¹,刘木华¹,张 扬²,万 奇¹,刘林林¹,徐 将^{1*}

(1.江西农业大学 工学院,江西 南昌 330045;2.江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】枫叶的纹理特征可以反映出其营养元素缺失的症状。偏振成像技术是一种增强物体特征对比度的有效方法,且获取过程简便。基于偏振图像的纹理特征模型,对相同生长环境下的4种不同色差枫叶开展了缺素诊断研究。【方法】以灰度共生矩阵的特征为研究依据,分别推导出了能量、熵、反差、相关性等纹理特征作为目标识别参量,构建了基于图像纹理特征的营养诊断模型。通过控制入射光的偏振态,在相同的试验环境下获取了36组不同振动方向上的偏振图像,并基于营养诊断模型提取了枫叶的纹理特征。利用Harris角点检测的特征信号提取算法分别对偏振图像和非偏振图像进行测量。根据检测的结果,分别选取了4块包含样品峰值信号且没有相互干扰的特征信号范围,减少了特征信号提取过程中的误差。结合BP神经网络对特征区域进行预处理,得到每一幅采集图像的不变矩。将枫叶的特征信号作为测试样本,利用MATLAB软件获得诊断模型的残差值分别为: $e_{\text{红枫叶}}=0.078\ 3$, $e_{\text{褐枫叶}}=0.101\ 4$, $e_{\text{黄枫叶}}=0.000\ 1$, $e_{\text{绿枫叶}}=0.015\ 3$ 。【结果】在无约束光照条件下,样品图像中纹理的非均匀程度或复杂程度都不会随着偏振片旋转角度的改变而呈现较大的差异。随着偏振角度的增大,偏振图像的4种特征参量都呈现出了明显的变化规律。与非偏振图像相比,偏振图像中各条特征参量曲线之间会随着叶片颜色的加深呈现梯度变化的趋势,且间隔保持稳定。【结论】在偏振散射特性作用下,利用纹理特征可以轻松地对枫叶营养状况进行诊断,且测量精度较高。该模型可以为无人机遥感技术实现树木病虫害的防治提供参考方法,在同一视场中快速实现多目标的识别与诊断。

关键词:偏振图像;纹理特征;诊断模型;神经网络

中图分类号:S718.3

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2023)01-0202-08



Study on Nutritional Diagnosis Method of Maple Leaf Based on Polarization Texture Feature

WANG Xiao¹,LIU Muhua¹,ZHANG Yang²,WAN Qi¹,LIU Linlin¹,XU Jiang^{1*}

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] The texture characteristics of maple leaves can reflect the symptoms of nutrient deficiency. Polarization imaging is an easy-access and effective method to enhance the contrast of object features. Based on the texture feature model of polarized images, the research of element deficiency diagnosis for maple

收稿日期:2022-09-22 修回日期:2022-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(32160417,31960363)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32160417,31960363)

作者简介:王晓,实验师,博士生,orcid.org/0000-0001-5789-0866,wangxiao0712@sina.com;*通信作者:徐将,讲师,博士,主要从事农产品图像特征分析与识别方面的研究,orcid.org/0000-0002-3744-4989,xujiangstart@163.com。

leaves with four different color differences in the same growth environment was conducted. [Method] Based on the characteristics of the gray level co-occurrence matrix, the texture features such as energy, entropy, contrast and correlation were derived as the target recognition parameters, and a nutritional diagnosis model based on image texture features was constructed. By controlling the polarization state of incident light, 36 groups of polarization images in different vibration directions were obtained in the same experimental environment, and the texture features of maple leaves were extracted based on the nutritional diagnosis model. The feature signal extraction algorithm based on Harris corner detection was used to measure polarized and unpolarized images respectively. According to the detection results, four feature signal ranges containing the peak signal of the sample and without mutual interference were selected to reduce the error in the process of feature signal extraction. Combining BPNN to preprocess the feature area, the invariant moments of each image were obtained. The characteristic signals of maple leaves were taken as the test sample, and the residual value of the diagnostic model obtained by using MATLAB software were $e_{\text{Red}}=0.078\ 3$, $e_{\text{Brown}}=0.101\ 4$, $e_{\text{Yellow}}=0.000\ 1$, $e_{\text{Green}}=0.015\ 3$. [Result] Under the unconstrained illumination condition, the non-uniformity or complexity of the texture in the sample image will not be significantly different with the change of the rotation angle of polarizer. With the increase of polarization angle, the four characteristic parameters of polarization image show obvious change rules. Compared with the unpolarized image, the characteristic parameter curves in the polarization image will show a gradient trend with the deepening of the color, and the interval remains stable. [Conclusion] The results showed that the nutritional status of maple leaves could be easily diagnosed by using texture features under polarization scattering characteristics, and the measurement accuracy was high. The model could provide a reference method for UAV remote sensing technology to realize the control of tree disease and insect pest, and quickly realize the recognition and diagnosis of multiple targets in the same field of view.

Keywords: polarization image; texture features; diagnostic model; neural network

【研究意义】枫树中的花青素作为一种不稳定的有机物,当遇到叶片细胞液时呈现红色^[1]。因此,枫叶变红可以反映出其营养元素的缺失,特别是氮元素^[2-3]。开展相同生长环境下不同枫叶色差的识别研究,有利于诊断分析养分、气温、湿度等环境因素对枫树生长的影响。【前人研究进展】如何有效地对枫叶进行缺素症状的检测与分类已经成为植保研究领域内的热点话题。近年来,随着对生态环境建设要求的不断提高,对叶片中所需营养元素进行科学高效地诊断分析已成为急需解决的技术难题。早期叶片营养诊断的方法主要是根据叶片色差^[4-5]、植株生长状况^[6-7]以及元素缺失后的某种特征形态^[8-9]来判别营养状况。现在,随着科技水平和测量手段的飞速发展,先前单一的诊断模式逐步向综合复杂的多元素诊断模式转换。根据测量方式的不同,又可分为形态诊断法、化学诊断法、生物化学诊断法、植物组织分析法^[10-13]等。这些叶片营养诊断方法都具有较高的测量精度,为植物的合理种植和精准施肥提供了前提和基础。但是,生物化学方法需要将叶片进行离体后才能测定,对植株进行整体研究时,工作量大且复杂,不利于开展叶片营养诊断的户外在线监测。

【本研究切入点】偏振成像技术已经被证明是一种适用于增强物体特征对比度的有效手段^[14-15]。视觉系统中,可以在每一个特定的偏振状态或其组合中实现数据的优化处理。【拟解决的关键问题】本研究结合偏振图像特征提取方法与数字图像处理技术分析元宝枫枫叶的纹理特征,同时利用BP神经网络算法构建营养缺失的自动诊断模型。该技术不仅可提高枫叶色差分类的识别效率,同时也可扩大植株的测量范围,为机载式山林枫树营养诊断系统提供技术支持。

1 试验设备与组成

试验样品为同一时期内采摘的4种不同颜色的元宝枫枫叶,在同一植株的不同分枝上各取20片,自然光下的形态如图1所示。

根据光的散射原理,利用平行光光源(IT3900)、偏振片 1(Bocic,OCZ202)、可控升降台、偏振片 2(Bocic,OCZ202)、镜头(Basler,C23-1216-2M)、工业相机(Basler,acA1280-60gc)、计算机等光学器件搭建了枫叶图像数据采集系统。将同一种颜色的 20 片枫叶依次放置于升降台中央,通过调节测量高度选择最清晰的图像信号采集位置。在 0° 到 360° 范围内,每隔 10° 旋转一次偏振片 2 上的刻度,获得不同振动方向上的偏振图像。为了降低测量系统对试验数据造成的误差,将 20 次测量的图像数据取平均,作为纹理特征分析与诊断系统构建的唯一标准。

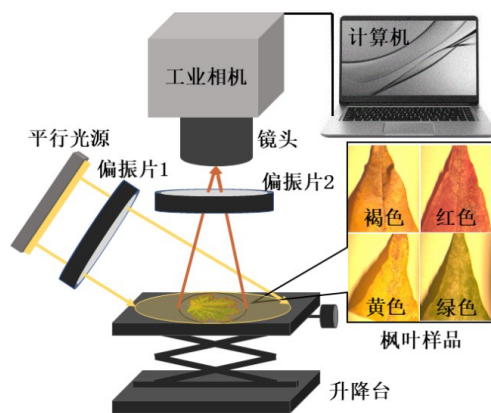


图1 测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement system

2 枫叶图像的纹理特征

与其他图像特征相比,纹理是一种描述图像各像元之间空间分布的区域特征,可以较好地兼顾图像的宏观性质与微观结构,作为目标识别的重要依据^[5,16]。

为了能够直观地描述不同色差枫叶的纹理状况,研究基于灰度共生矩阵的特征,分别推导出能量 f_1 、相关性 f_2 、熵 f_3 、反差 f_4 作为样品的识别参数,从而反映出矩阵的不同状况。在图像中任意选取一点 (x, y) 以及偏离点 $(x + a, y + b)$ 。设这组点对的灰度值为 (i, j) ,设灰度值的级数为 L ,则在整幅图像中可以统计出每一种 (i, j) 值出现的次数和归一化后的概率 P_{ij} ,则称方阵 $[P_{ij}]_{L \times L}$ 为灰度共生矩阵。因此,上述4种特征参量与灰度共生矩阵的关系式可以描述为:

$$f_1 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij}^2 \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i - \mu_x)(j - \mu_y) P_{ij} \quad (2)$$

$$f_3 = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij} \log_2 P_{ij} \quad (3)$$

$$f_4 = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} |i - j|^k P_{ij} \quad (4)$$

式中, $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ 分别为 $m_x = \sum_{j=0}^{L-1} P_{ij}$ 和 $m_y = \sum_{i=0}^{L-1} P_{ij}$ 的均值和标准差。

根据上述参量公式,分别计算出每一种枫叶图像在卤素灯(非偏振光)照射下的4种纹理特征参数,其在各偏振角度下的变化趋势如图2所示。

在卤素灯照射条件下,利用相机采集的4种叶片能量 f_1 的特征差异并不明显,在相同的变化趋势下各测量数据交错在一起。这一现象反映了样品图像灰度分布的纹理粗细程度差异较弱。同时,特征参量熵 f_3 也存在着同样的问题,在无约束光照条件下,样品图像中纹理的非均匀程度或复杂程度的差异都不会随着采集端偏振片旋转角度的改变而呈现较大的差异。利用这两种特征参量无法将不同偏振角度下的信号进行区分。虽然这4种样品的相关性 f_2 和反差值 f_4 都随着偏振角度的改变呈现相同的变化趋势且在同一角度下的参量值各不相同,但是这4组数据在 0° 、 180° 、 360° 等角度附近的差异性并不明显,尤其是红-黄枫叶和褐-绿枫叶这两类样品,在水平振动和垂直振动方向都出现了交叉的现象。因此,在卤素灯模拟自然光照射条件下,利用灰度共生矩阵推导的能量、相关性、熵、反差这4种纹理特征参量直接对枫叶样品的色差进行分类识别的操作性不高。虽然反差与相关性存在一定的差异,但是在测量过程中出现了多处交叉重复的参量信号,这为诊断系统精确性的提高造成了困难。

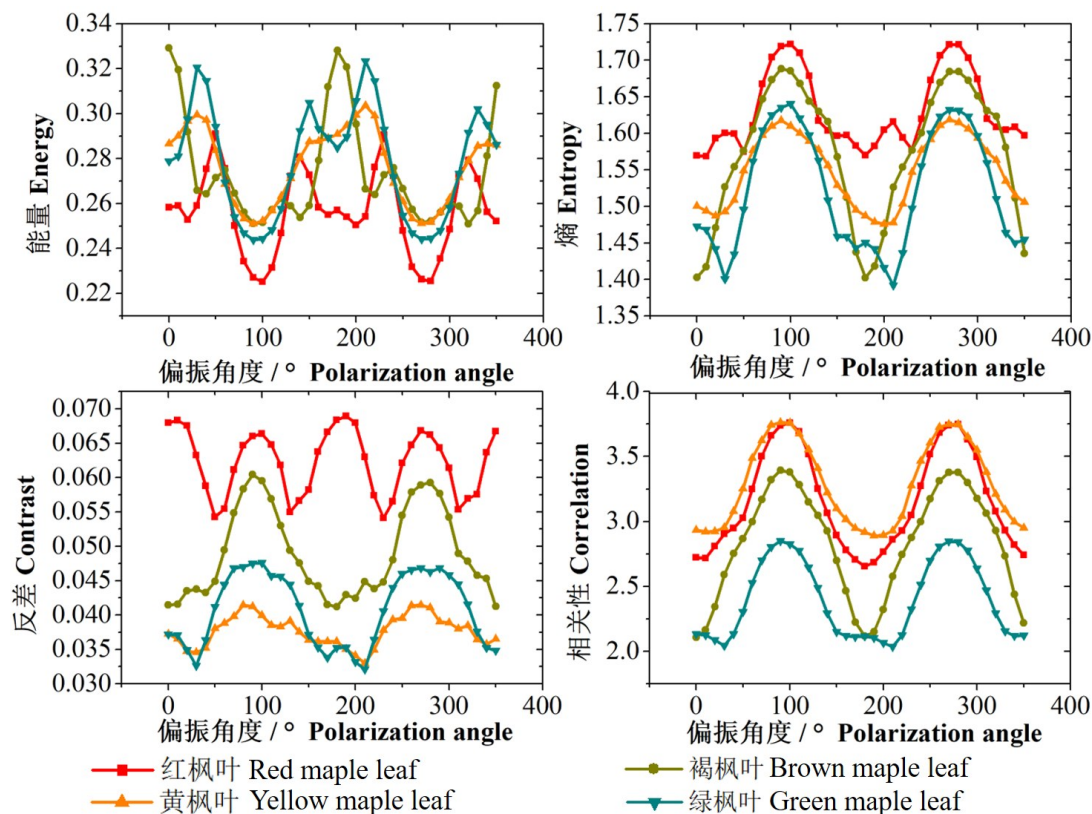


图2 卤素灯下不同叶片的纹理特征参量

Fig.2 Textural index of different leaves under halogen lamp

3 偏振图像的纹理特征

根据麦克斯韦方程可知,入射光经介质反射后,可以得到反射光斯托克斯矢量 $[S_{0R} \ S_{1R} \ S_{2R} \ S_{3R}]^T$ 与入射光斯托克斯矢量 $[S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 之间的关系式为:

$$\begin{bmatrix} S_{0R} \\ S_{1R} \\ S_{2R} \\ S_{3R} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan \theta_-}{\sin \theta_+} \right)^2 \times \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_- + \cos^2 \theta_+ & \cos^2 \theta_- - \cos^2 \theta_+ & 0 & 0 \\ \cos^2 \theta_- - \cos^2 \theta_+ & \cos^2 \theta_- + \cos^2 \theta_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\cos \theta_+ \cos \theta_- & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\cos \theta_+ \cos \theta_- \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, $\theta_{\pm} = \theta_i \pm \theta_r$ 。由于在测量过程中,入射角度 θ_i 和观测角度 θ_r 都是已知的,所以叶片表面散射光信号的偏振分量可以通过菲涅尔方程计算得到。因此,可以判断采集获得的偏振散射图像的每个分量的相位要么等于入射波相应分量的相位值,要么与其相差 180° 。如果散射信号的相位出现了其他的参量值,则说明是由于样品表面晶体结构的不同而造成了散射信号的偏差^[17],这一特性可以为不同色差枫叶的识别提供理论依据。

在相同的测量环境下,利用632.8 nm波长的偏振光源均匀照射在各枫叶样品表面,在垂直散射方向上每隔 10° 采集一组样品的偏振图像信息。同时,以同样的图像处理手段提取偏振纹理特征信号,其随着偏振角度的变化趋势如图3所示。

随着偏振角度的增大,4种特征参量都呈现出明显的变化规律,且层次性一致。同时,与图2中的4种特征参量相比,曲线之间也随着叶片颜色的变化呈上升或下降的趋势,且间隔保持稳定。红-褐-黄3种枫叶在整个测量过程中都没有出现信号交叉的现象。有序的特征信号排列可以说明,随着叶片颜色的加深,营养元素含量下降,生长活性减弱,表面越来越光滑。叶片表面的正向镜面反射削弱了光照范围内的偏振散射特性,使得叶片图像中的纹理特征更加明显。因此,结合偏振光学手段与图像处理技术可以更好地对枫叶样品进行分类,为自动营养诊断系统的构建奠定了基础。

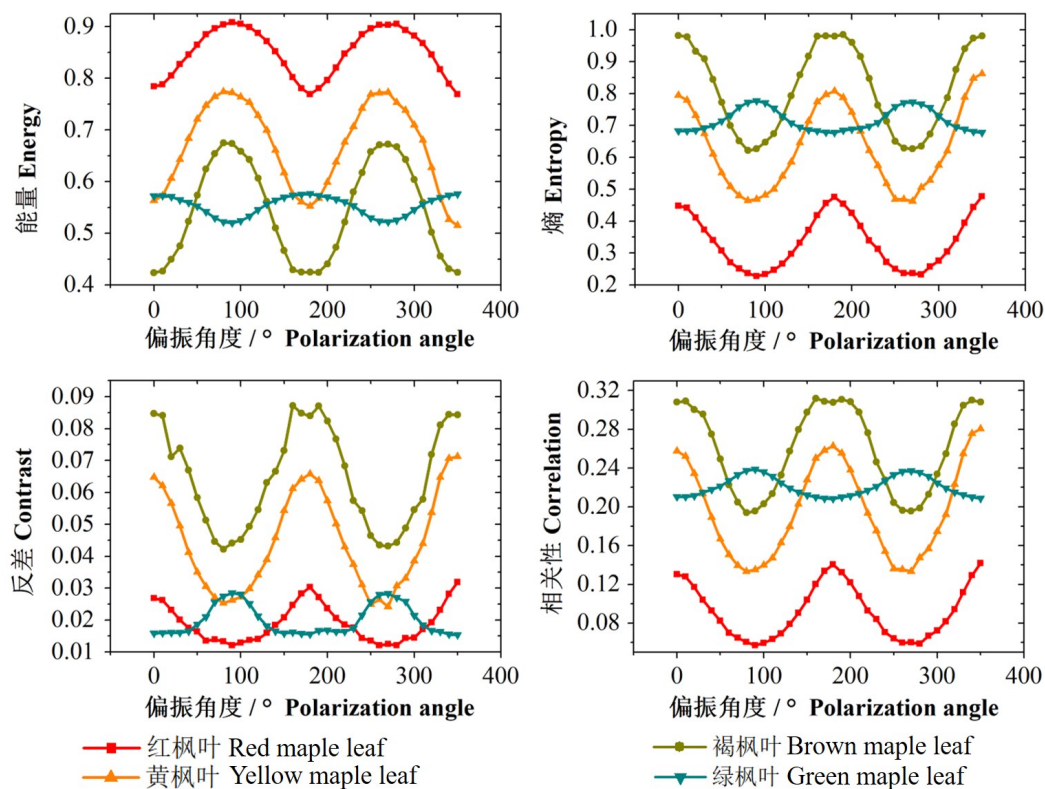
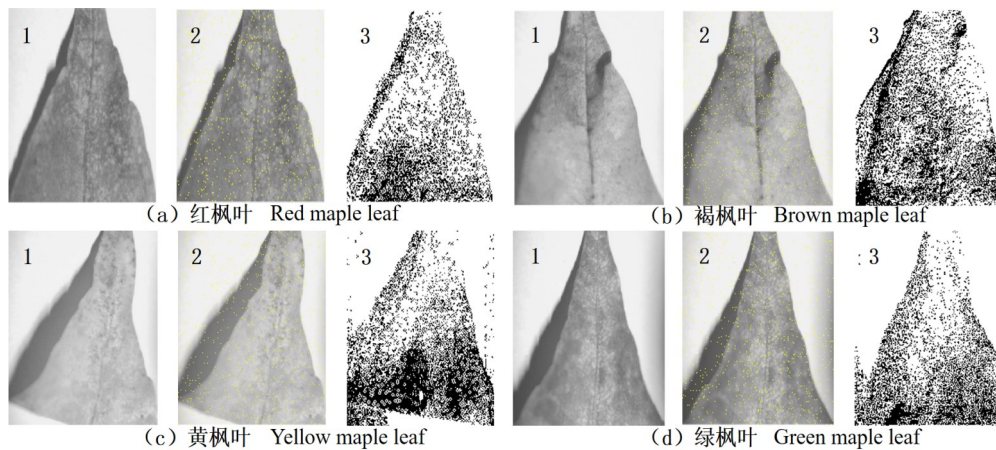


图3 偏振光下不同叶片的纹理特征参量

Fig.3 Textural index of different leaves under polarized light

4 诊断模型

基于枫叶的纹理特征,结合 Harris 角点检测的特征信号提取算法,分别对两种不同光照环境下的枫叶样品的角点进行测量,检测结果如图 4 所示。



1:输入图片;2:图像的 Harris 角点;3:偏振图像的 Harris 角点

1:Input image;2:Harris corner of image;3:Harris corner of polarized image

图4 样品进行 Harris 角点检测的结果

Fig.4 Harris corner detection results of samples

在相同的测量环境下,偏振光图像中信息稳定丰富的区域要明显多于卤素灯光照下的叶片。同时,4 种叶片不仅有许多相似的特征信号,而且各自还有单独的特征参量。以上这些特征信号中有一些非常接近,这将给枫叶营养诊断模型的测量带来不可避免的误差。为了提高测量精度,本文利用了偏振散射系数^[18]的概念,对特征信号区域内的偏振散射系数进行积分,计算出选择区域范围内各点的总能量效率,减少了特征信号提取过程中的误差。

基于枫叶的偏振纹理特征,分别选取偏振图像中4块像素点数量相同的特征区域为:红枫叶(170:340,15:240),褐枫叶(25:195,335:560),黄枫叶(275:445,100:325)和绿枫叶(285:455,335:560)。选取区域内的坐标为原始枫叶图像中横坐标 x 和纵坐标 y 的像素点位置,特征信号包含了样品的大部分峰值信号,并且它们之间没有相互作用,一种叶片的信号范围不包含其他3种叶片的纹理特征信号。

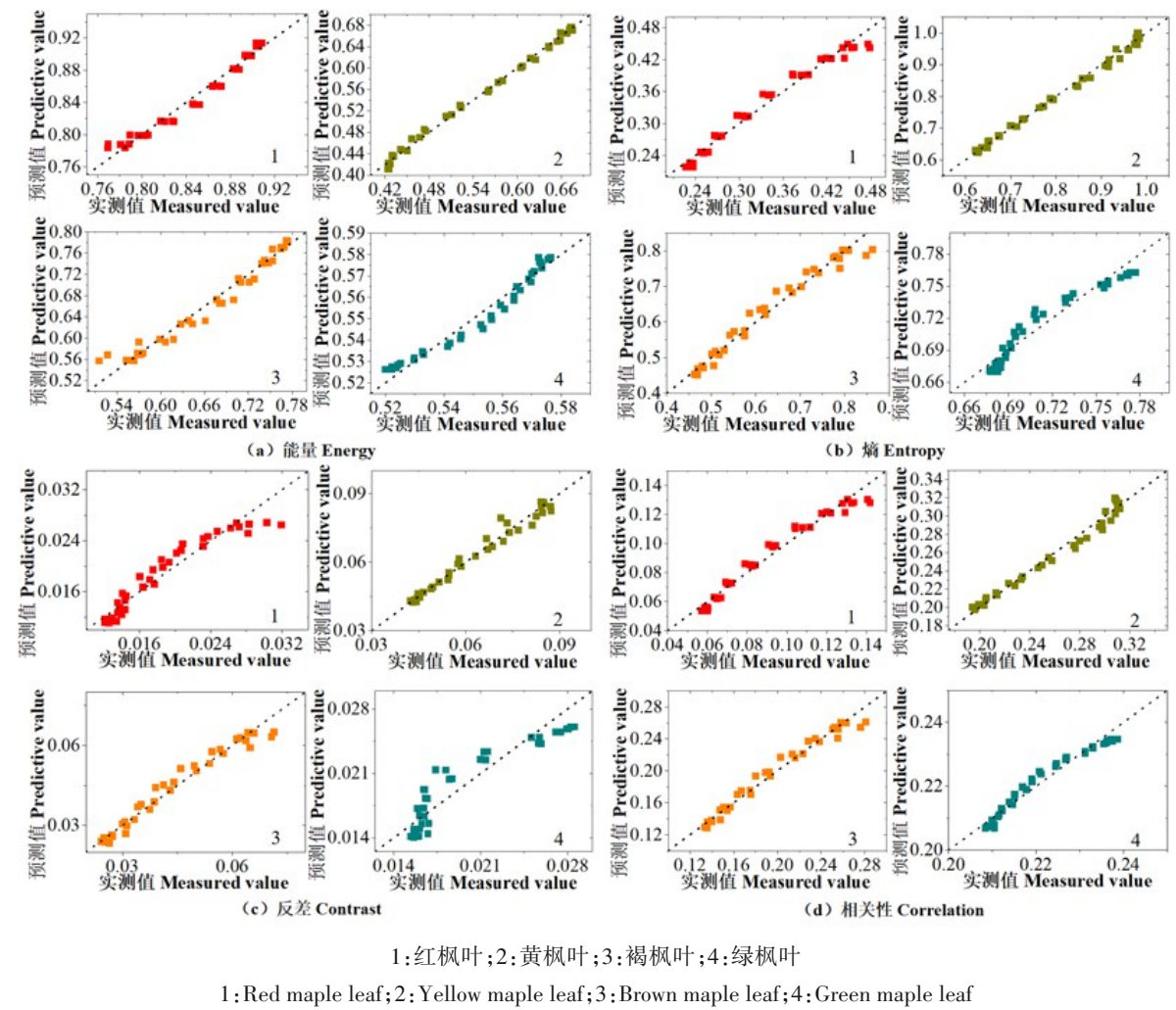


图5 BPNN模型预测值与实际值的相关度对比图

Fig.5 Comparison diagram of correlation between predicted value and actual value of BPNN model

由于在诊断过程中,枫树为三维立体结构,不同的角度、距离和环境在图像中的旋转情况十分复杂^[19-20]。为了保证分类识别的准确率和应用建模的简单化,选用BP神经网络与矩特征相结合的识别方法。将上述选取的4个不同偏振纹理特征区域进行预处理,求出每一幅采集图像的7个不变矩,消除平移、旋转、尺度等因素的影响。利用一组不变矩和样品编号作为一个训练样本,使得每一个偏振图像样品都获得一组训练样本。同时,使用304704个样本对模型进行训练,达到预先设置的训练条件,最后利用自适应强分类器对模型的性能进行优化,提高模型的识别准确率。

如图5所示,根据训练模型,将4种枫叶的2116个偏振特征信号作为测试样本,得到诊断模型预测值与实际值的相关度对比图。研究表明,在偏振散射特性作用下,利用偏振纹理特征可以较容易地对枫叶营养状况进行诊断,且测量精度较高。4种枫叶分类模型的残差分别为: $e_{\text{红枫叶}}=0.0783$, $e_{\text{褐枫叶}}=0.1014$, $e_{\text{黄枫叶}}=0.0001$, $e_{\text{绿枫叶}}=0.0153$ 。相比较于其他3种叶片,褐色枫叶的模型误差最大,其主要原因来自于自身特征信号较弱的影响,根据纹理特征随偏振角度变化的趋势图也可以发现褐枫叶的4种参量波动变化最为明显。由此可见,本文提出的诊断模型符合实测特征参量数据的识别规律,且残差较小,具有较高的稳定性和可靠性。

5 结论与讨论

综上所述,本文利用偏振光学测量技术与图像纹理特征识别方法构建了元宝枫叶片营养色差的诊断模型,实现了特征信号的快速分类。首先,利用测量装置分别采集了4组枫叶的非偏振图像,基于灰度共生矩阵的特征,分别推导出了能量、相关性、熵、反差等纹理特征作为目标识别的依据。明确了在无约束光照条件下,样品图像中纹理的非均匀程度或复杂程度的差异都不会随着采集端偏振片旋转角度的改变而呈现较大的区别,利用纹理特征参量直接对枫叶样品的色差进行分类识别的操作性不高。其次,通过控制入射光的偏振态,在相同的试验环境下获取了4组枫叶的偏振图片,并用相同的特征参量推导方式提取了纹理特征。随着采集端偏振角度的变化,4种特征参量都呈现出明显的变化规律,且层次性相同。与非偏振图像相比,偏振图像中各条特征参量曲线之间会随着叶片颜色的加深呈现梯度变化的趋势,且间隔保持稳定。然后,根据 Harris 角点检测的特征信号提取算法分别对两组枫叶图像的角点进行测量。在相同的测量环境下,偏振图像中信息稳定丰富的区域要明显多于卤素灯光照下的叶片。结合角点检测的结果,分别选取了4块包含了样品峰值信号且没有相互干扰的特征信号范围,减少了特征信号提取过程中的误差。最后,结合 BP 神经网络对4个不同特征区域进行预处理,求出每一幅采集图像的不变矩。将枫叶的特征信号作为测试样本,开展实测图像的分类识别检测,并利用 MATLAB 软件获得诊断模型的残差值。

本研究证明,利用偏振测量技术可以较好地提高枫叶色差识别效率,有利于叶片色彩的量化,快速判断营养缺失状况,可以为大面积树林缺素病害的识别和治疗提供技术参考。在后续的工作中,笔者还将对不同色差枫叶叶片中的具体营养元素的参考含量进行测量,并且利用偏振测量技术构建定量诊断模型。

致谢:江西农业大学工学院姚明印教授和江西省教育厅科技项目(GJJ210422)同时对研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 朱璐, 闻婧, 马秋月, 等. 鸡爪槭金陵丹枫和金陵黄枫叶片呈色分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(2): 521-527.
ZHU L, WEN J, MA Q Y, et al. Analysis on leaf colour generation of *Acer palmatum* Jinling Danfeng and Jinling Huangfeng [J]. Jiangsu journal of agricultural sciences 2022, 38(2): 521-527.
- [2] 冯海华. 不同施氮量对元宝枫叶片营养成分含量的影响[J]. 陕西林业科技, 2020, 48(2): 1-5.
FENG H H. Effect of different nitrogen proportion on the content of nutrients in the leaves of *Acer truncatum* [J]. Shaanxi forest science and technology, 2020, 48(2): 1-5.
- [3] TIANHUA S, QIANGQIANG X, LEI Z, et al. Analysis of main metabolisms during nitrogen deficiency and compensation in rice[J]. Acta physiologiae plantarum, 2019, 41(5): 1-14.
- [4] 谷荣辉. 中国乡土树种元宝枫的化学成分及代谢组学研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2019.
GU R H. Chemical constituents and metabolomics of *Acer truncatum*, an arbor species native to China [D]. Beijing: Minzu University of China, 2019.
- [5] 李修华, 卢显杰, 奚金阳, 等. 智能手机 RGB 图像检测植物叶片叶绿素含量的通用方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 145-151.
LI X H, LU X J, XI J Y, et al. Univeisal method to detect the chlorophyll content in plant leaves with RGB images captured by smart phones[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(22): 145-151.
- [6] 王胤飞. 不同肥料及浓度对边坡修复植物生长的影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
WANG Y F. Effects of different fertilizers and concentrations on the growth of slope restoration plants [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [7] 吴宣毅, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 种植行距与灌水量对西北日光温室番茄生育和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 81-89.
WU X Y, CAO H X, HAO S X, et al. Effect of planting row spacing and irrigation amount on tomato growth and yield in solar greenhouse in Northwest China [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering 2018, 34(24): 81-89.
- [8] 雷威, 谢少亮, 薛晓艳. 浅析植物缺素症的危害及防治措施[J]. 农业与技术, 2016, 36(18): 1-19.

- LEI W, XIE S L, XUE X Y. Preliminary analysis on the harm and prevention measures of plant element deficiency[J]. Agriculture and technology, 2016, 36(18): 1-19.
- [9] 吴正敏, 曹成茂, 王二锐, 等. 基于形态特征参数的茶叶精选方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 315-321.
- WU Z M, CAO C M, WANG E R, et al. Tea selection method based on morphology feature parameters[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(11): 315-321.
- [10] 冯裕才. 香蕉硼铁锰锌铜营养形态诊断与缺素营养效应研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- FENG Y C. Nutrients diagnosis of banana with B, Fe, Mn, Zn and Cu deficiency and banana NPK nutrition state under the micro-nutrients[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.
- [11] 陈雅婷, 罗永忠, 申海宁, 等. 新疆大叶苜蓿生物量及抗氧化酶类对土壤水分胁迫的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(4): 128-136.
- CHEN Y T, LUO Y Z, SHEN H N, et al. Response of biomass and antioxidant enzyme activity of *Medicago sativa* cv. Xinjiang Daye to soil water stress[J]. Journal of Gansu agricultural university, 2020, 55(4): 128-136.
- [12] 李博园, 韩敏, 张明英, 等. 杭白芷根发育过程中香豆素类成分主要积累部位及含量变化研究[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(7): 48-52.
- LI B Y, HAN M, ZHANG M M, et al. Study on main accumulation parts of coumarin and its content change during development of *Angelicae dahurica* Radix[J]. Shaanxi journal of agricultural sciences, 2020, 66(7): 48-52.
- [13] WANG L, CHEN Y, ZHOU Y, et al. Litter chemical traits strongly drove the carbon fractions loss during decomposition across an alpine treeline ecotone[J]. Science of the total environment, 2021, 753: 142287.
- [14] 寻华生, 张晶晶, 刘晓, 等. 基于偏振图像的低照度场景多目标检测算法[J]. 红外技术, 2022, 44(5): 483-491.
- XUN H S, ZHANG J J, LIU X, et al. Multi-target detection of low-illuminance scene based on polarization image[J]. Infrared technology, 2022, 44(5): 483-491.
- [15] 刘泽奇, 蔡小舒, PAUL B, 等. 基于去偏振-偏振图像动态光散射的纳米棒尺度测量[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 221-229.
- LIU Z Q, CAI X S, PAUL B, et al. Dimension measurement of nanorods based on depolarized-polarized image-based dynamic light scattering[J]. Acta optica Sinica, 2021, 41(21): 221-229.
- [16] MULLER T, ORADU S, IFA D R, et al. Direct plant tissue analysis and imprint imaging by desorption electrospray ionization mass spectrometry[J]. Analytical chemistry, 2011, 83(14): 5754-5761.
- [17] 尹佳琪, 王世勇, 李范鸣. 基于改进主成分分析的分焦平面偏振图像去噪算法[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 64-73.
- YIN J Q, WANG S Y, LI F M. Division-of-focal-plane polarization image denoising algorithm based on improved principal component analysis[J]. Acta optica Sinica, 2021, 41(7): 64-73.
- [18] XU J, QIAN W, CHEN Q, et al. Calculation model of the Hyperion reflected light scattering efficiency[J]. Applied optics, 2017, 56(18): 5248-5252.
- [19] 袁山, 汤浩, 郭亚. 基于改进 Mask R-CNN 模型的植物叶片分割方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 212-220.
- YUAN S, TANG H, GUO Y. Segmentation method for plant leaves using an improved mask R-CNN model[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38(1): 212-220.
- [20] 陈善雄, 伍胜, 于显平, 等. 基于卷积神经网络结合图像处理技术的荞麦病害识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 155-163.
- CHEN S X, WU S, YU X P, et al. Buckwheat disease recognition using convolution neural network combined with image processing[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(3): 155-163.