

基于光饱和影响校正的作物叶绿素分布光谱成像检测

孙红¹, 邢子正¹, 乔浪¹, 龙耀威¹, 高德华¹, 李民赞^{1*}, Qin Zhang²

1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083

2. Center for Precision & Automated Agricultural System, Washington State University, Prosser, WA 99350, USA

摘要 叶绿素含量是作物光合能力与营养评价的重要指标, 因此快速检测作物叶绿素含量与分布可为作物营养动态分析与长势评估提供支持。基于 RGB(Red, Green, Blue)和 NIR(Near Infrared)多光谱图像的获取, 开展玉米作物营养状态分布光谱学成像检测。构建了多光谱图像采集平台获取 RGB 和 NIR 图像, 研究了基于光饱和校正算法的 RGB 图像的光饱和校正与 NIR 图像去噪方法, 通过图像的匹配分割, 冠层的提取校正, 建立了基于冠层图像的作物 SPAD 值检测模型与分布成图。采集 15 株玉米植株 RGB-NIR 图像, 并同步获取不同植株, 不同位置共 68 个叶绿素含量指标 SPAD 值。首先对 RGB 图像进行光饱和校正, 再对 NIR 图像进行滤波和图像增强, 其次对 RGB 和 NIR 图像进行了 SURF(speeded-up robust features)和 RANSAC(random sample consensus)图像匹配, 利用 RGB 图像的颜色特征, 采用 ExG(Extra Green)和 OTSU 算法生成分割掩模, 对 RGB 图像和 NIR 图像进行分割提取, 提取图像的 R, G, B 和 NIR 分量, 利用 4 阶灰度板进行反射率校正, 然后计算作物图像中像素级 P_{SPAD} 值, 并建立图像 P_{SPAD} 值与叶绿素仪 SPAD 值的拟合模型, 最后绘制作物 SPAD 分布图。通过 HSI(Hue, Saturation, Intensity)彩色模型中的 I 分量直方图对比去饱和和前后光分布范围, 以作物 SPAD 值分布图验证光饱和校正算法对作物叶绿素含量分布检测提升的效果。RGB 图像光饱和校正前 I 分量集中在[140~180]之间, 光饱和校正后的 RGB 图像 I 分量集中在[85~130]之间, 校正了相机成像时产生模糊和 RGB 图像饱和。对分割后的 RGB 图像和 NIR 图像提取 R, G, B, NIR 分量进行 4 阶灰度板校正, 相关系数分别为 0.829, 0.828, 0.745 和 0.994, 进而生成 R, G, B 和 NIR 四波段的反射率伪彩色图像, 反射率 $R_{NIR} > R_G > R_R > R_B$ 。体现了作物的在蓝光和红光区域吸收光, 在绿光区域和近红外区域反射光的光谱特性。校正前后的 R 和 NIR 分量反射率计算图像 P_{SPAD} 值拟合叶绿素含量指标 SPAD 值的模型结果显示, 校正前 R^2 为 0.332 6, 校正后 R^2 为 0.619 3, 绘制作物的 SPAD 特征分布图, 可作为作物的营养动态快速分析与分布检测提供技术支持。

关键词 光饱和校正; 多光谱分析; 作物检测; 叶绿素分布; 图像处理

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3897-07

引言

叶绿素是重要的植物光合作用色素, 也是作物生长的重要营养指标, 快速、无损的估测作物叶绿素含量与分布对精细农业具有重要的意义^[1]。植物高光谱机理研究结果表明作物叶绿素、类胡萝卜素等色素体存在对可见-近红外光的典型吸收与反射特性, 为叶绿素光谱学无损且快速检测奠定了

基础^[2]。在明确的机理支持下, 由于多光谱图像比高光谱图像的获取成本低, 数据处理简单且效率高, 受到了广泛的关注和应用^[3]。

光照是影响作物光谱与图像分析的重要干扰因素。一方面, 利用标准灰卡分析多光谱成像结果指出光照存在不均匀性^[4]; 另一方面, 受到叶面旋转、叶面平整度、环境光和作物大小的多重影响, 经常会遇到局部光饱和导致作物多光谱图像存在非均匀性和模糊的问题^[5-6]。因而, 剔除由光照引

收稿日期: 2019-05-27, **修订日期:** 2019-09-21

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0300600-2016YFD0300606), 广西科技重大专项经费项目(桂科 AA18118037), 国家自然科学基金项目(31971785, 31501219), “海外名师”项目(MS2017ZGNY004), 中国农业大学“电子与通信工程”实践教学基地建设项目(ZYXW037)和研究生教改项目(HJ2019029, YW2019018)资助

作者简介: 孙红, 女, 1980年生, 中国农业大学信息与电气工程学院副教授 e-mail: sunhong@cau.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: limz@cau.edu.cn

起的非均匀性影响,是提高作物多光谱图像质量和叶绿素含量光谱学成像检测的基础。

光照不均处理的方法主要有以直方图均衡化方法为代表的灰度变换法,基于照明-反射加和模型的 Gamma 校正和同态滤波法,基于梯度域分析的图像增强方法三类^[7]。其中,基于直方图均衡化的光照不均匀校正侧重于对比度的增强,在图像增强的同时,会伴生出现块效应、增强细节与增强噪声等问题^[8-9];基于 Gamma 校正和同态滤波方法的应用研究指出,当处理光照差异较大时的图像时,图像中的细节信息会被削弱^[10];基于梯度域增强方法中,刘洋等提出 Retinex 算法可以有效地消除光晕效应及大面积白斑,且具有良好的边缘保持能力,但它假设颜色具有恒常性,忽略了图像的亮度变化过程对颜色的关联影响,对亮度较大的位置处理效果不佳^[11]。在上述研究的基础上,Nair^[12]等提出基于暗通道和环绕滤波器结合的图像校正算法,它充分考虑了亮度的变化影响,从而可以较好的消除图像中存在的局部模糊和饱和不均匀性问题。

为了提高作物多光谱图像数据源质量,实现作物叶绿素含量的分布成像检测,以玉米为对象,通过 RGB-NIR 图像采集平台获取 RGB(Red, Green, Blue)和 NIR(near infrared)多光谱图像,通过基于光饱和和去除算法的 RGB 图像的光饱和和校正,并对 NIR 图像进行图像去噪,然后将 RGB 和 NIR 图像进行图像匹配对齐和作物目标的分割。通过 4 阶灰度板对 R, G, B 和 NIR 分量进行反射率校正,进行 R, G, B, NIR 反射率伪彩色图像分析,选取 R 分量和 NIR 分量双波段建立 SPAD 预测模型,并绘制玉米植株 SPAD 值分布图,为作物营养动态与分布监测提供技术支持。

1 实验部分

1.1 图像获取

搭建了获取作物图像信息的平台如图 1 所示,包括 RGB-NIR 相机系统,相机支架,相机控制处理器,待测作物植株,无线 WIFI 模块和 PC 机。使用时,首先处理器控制相机系统采集待测作物植株 RGB-NIR 图像,其次经无线传输模块传输到 PC 机中。其中,相机系统采用同步快门触发拍摄方式,防止图像失真,可以同时获取 RGB 图像和 NIR 图

像。NIR 图像中心波长位于 830 nm, RGB 和 NIR 图像的分辨率均为 640×480 像素。

应用本系统于 2018 年 11 月在北京农信中心玉米培育温室开展玉米植株检测实验。温室平均温度为 25°C ,湿度为 16%,天气状态为晴天。实验时相机系统距离地面 1.6m,玉米植株处于拔节期,共计 15 株。与此同时,使用 SPAD 叶绿素仪测量叶片不同位置的叶绿素 SPAD 值,每个样本植株选取作物冠层叶片,每个冠层叶片分为上中下三个叶位,根据叶片大小选取叶片不同部分 3~6 个检测点,则共有 68 个样本点。

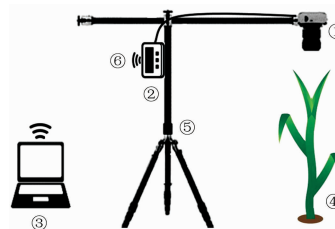


图 1 图像采集系统

①: RGB-NIR 相机系统; ②: 相机控制处理器; ③: PC;
④: 待测作物植株; ⑤: 相机支架; ⑥: WIFI

Fig. 1 Image acquisition system

①: RGB-NIR camera system; ②: Camera control processor;
③: PC; ④: Crop plants to be tested; ⑤: Camera bracket; ⑥: WIFI

1.2 图像处理流程

图像处理包括 5 个主要步骤:图像预处理、图像匹配、图像分割、图像参数提取及反射率校正、SPAD 空间分布可视化,总体流程如图 2 所示。其中图像预处理针对 RGB 和 NIR 图像分别进行,包括:图像灰度增强、RGB 图像光饱和和处理,NIR 图像去噪。首先对 RGB 图像进行拉普拉斯变换图像增强,提高图像的边缘和纹理等细节特征,然后,采用光饱和去除对 RGB 图像进行校正。同时对 NIR 图像进行中值滤波去噪,然后再进行拉普拉斯变换图像增强。对 NIR 图像可能受到的光环境影响,在完成图像分割后,基于标准灰度板进行反射率校正,从而最终实现对 RGB 和 NIR 多光谱图像光饱和和影响的抑制。基于校正后图像开展作物冠层叶绿素含量的分布检测。

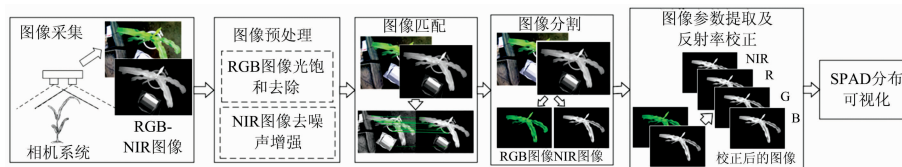


图 2 图像处理流程

Fig. 2 Image processing flow

1.3 RGB 图像光饱和和去除

大气中的水汽和灰尘可以使相机成像模糊,同时强光线可以使 RGB 图像饱和。本工作采用光饱和和校正算法,算法流程如图 3 所示,首先提取图像的暗通道,通过导向滤波并结

合大气光值计算 RGB 图像的透射率图像,最后对图像进行恢复,消除图像因光饱和的干扰而产生的图像模糊^[13]。利用 HSI(Hue, Saturation, Intensity)彩色模型提取其 I 分量的直方图,对光饱和和去除前后图像光照分布情况进行对比分析。

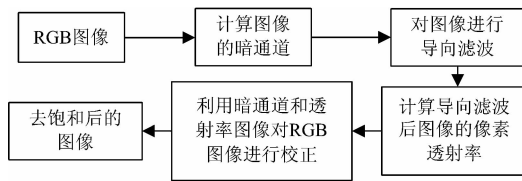


图 3 光饱和去除流程图

Fig. 3 Flow chart of light saturation removal

① 暗通道计算：在 RGB 图像中，由于光线的不均匀，在某些像素上至少一个颜色通道具有很低的灰度值，在 R, G, B 三个颜色通道上具有很低灰度值的像素组成图像的暗通道，计算公式如式(1)所示。

$$I_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{C \in \{R, G, B\}} I_C(y)) \quad (1)$$

式中 $I_{\text{dark}}(x)$ 为暗通道值， $\Omega(x)$ 表示以像素为中心的一个窗口， $I_C(y)$ 为以像素 x 为中心的一个窗口下的 RGB 图像的一个通道。

② 像素透射率的计算：如式(2)所示，式中 $t(x)$ 为透射率计算值， ω 为校正效果权值， $\omega \in (0, 1)$ ， $I_C(y)$ 为以像素 x 为中心的一个窗口下的 RGB 图像的一个通道。 A_C 为 R, G, B 三个通道的大气光值。 C 为 RGB 图像，R, G, B 三个通道。

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{C \in \{R, G, B\}} \frac{I_C(y)}{A_C} \right) \quad (2)$$

③ 图像大气光值的计算：通过暗通道图像获取，首先按照亮度的大小从暗通道图中取前 0.1% 的像素，然后在原始 RGB 图像中寻找具有最高亮度的像素值作为大气光值。最终通过式(3)对图像进行恢复。

$$S(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (3)$$

式中 $S(x)$ 为校正后的 RGB 图像， $I(x)$ 为原始 RGB 图像， t_0 为调整阈值， A 为大气光值。

1.4 基于 SURF 的 RGB 和 NIR 图像匹配

采用 SURF (speeded-up robust features) 算法和 RANSAC (random sample consensus) 算法对 RGB 图像和 NIR 图像进行图像匹配^[14]。图像匹配的关键要保证其较高的鲁棒性和较低的计算时间，在传统的图像匹配算法中，SURF 算法的迭代速度比 SIFT (scale-invariant feature transform) 算法快 3 倍，在相同的匹配率下，SURF 所需要的图像重叠区域要小于 SIFT，在不同的环境中，SURF 算法有更高的鲁棒性。因而选取 SURF 算法进行多光谱图像匹配，主要包括四个步骤：

① 构建黑塞矩阵，生成特征点用于特征提取，如式(4)所示。

$$H(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$ 为 f 像素 x 方向二阶导， $\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ 为 y 方向二阶导，

$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$ 为先 x 后 y 方向二阶导。

② 构建尺度空间；③ 特征点主方向分配；④ 生成特征点描述子。

1.5 作物图像区域分割

通过超绿算法 (ExG, Extra Green) 和最大类间方差算法 (OTSU) 分离 RGB 图像中作物和背景，得到掩模，从而实现 RGB 和 NIR 图像的分割^[15-16]。在 RGB 图像中，颜色特征是最主要，最明显的特征。作物图像的 G 分量要比 R 分量和 B 分量值大的多，因此可以用 ExG 算法 (2G-B-R) 提高 G 分量的比重，并提取 RGB 图像的灰度化因子，对灰度化因子采用 OTSU 算法计算二值化阈值，生成二值化掩模图像。利用掩模图像对 RGB 图像进行分割，提取作物区域图像。

1.6 反射率校正与叶绿素含量空间分布成像

提取 4 阶灰度板的 RGB 和 NIR 图像的 R, G, B, NIR 分量进行反射率建模并得到校正公式。计算分割后的 RGB 图像 R 分量和 NIR 图像的像素灰度值，进行反射率校正计算，并代入式(5)计算作物图像中像素级 P_{SPAD} 值，然后建立图像 P_{SPAD} 与叶绿素仪 SPAD 值的拟合模型，从而绘制作物图像中叶绿素含量 SPAD 值空间分布伪彩色图像。

$$P_{\text{SPAD}} = K \lg \frac{IR_t/IR_0}{R_t/R_0} \quad (5)$$

式中， P_{SPAD} 为叶绿素含量， IR_t/IR_0 为 NIR 波段的反射率， R_t/R_0 为红光波段的反射率， K 为常数。

2 结果与讨论

2.1 RGB 图像光饱和去除

通过图像采集平台获取的图像，经过拉普拉斯算子预处理后如图 4(a) 所示，按照 HSI 彩色模型提取其 I 分量直方图指示其光照分布情况如图 4(b) 所示。将 RGB 图像通过光饱和和去除算法得到暗通道图像如图 5(a) 所示，由于窗口大小设置为 15，暗通道图像呈现马赛克布局。通过导向滤波和得到图像的透射率图像如图 5(b) 所示。RGB 图像光饱和和去除后的结果如图 5(c) 所示，其 I 分量直方图如图 5(d) 所示。

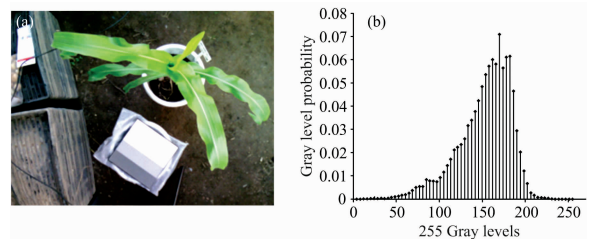


图 4 预处理后的 RGB 图像

(a): RGB 图像; (b): RGB 图像 I 分量直方图

Fig. 4 Preprocessed RGB image

(a): RGB Image; (b): I -component histogram

对比光饱和去除前后图像 I 分量直方图来评价光饱和去除的效果，从图 4(b) 和图 5(d) 可以知，光饱和去除前 I 分量集中在 [140~180] 之间，光饱和去除后的 RGB 图像 I 分量比 RGB 图像低，集中在 [85~130] 之间，说明光饱和去除处理降低了图像的亮度，可以一定程度上消除图像中存在的光强过饱和的现象。

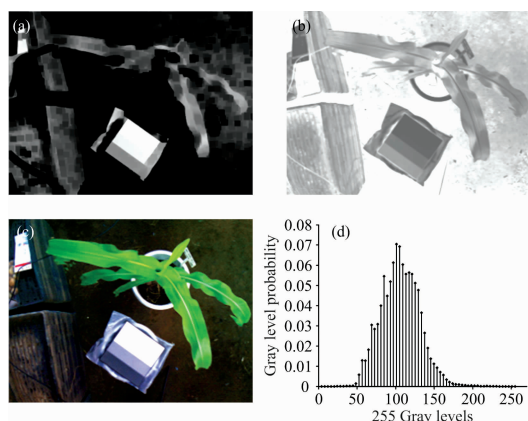


图 5 光饱和去除过程与结果

(a): 暗通道图像; (b): 透射率图像;
(c): 光饱和去除结果; (d): I 分量直方图

Fig. 5 Light saturation removal processing

(a): Dark channel images; (b): Transmittance image; (c): Result of light saturation removal; (d): I -component histogram

2.2 NIR 图像噪声消除

由于相机采集系统的结构光照射,使得 NIR 图像上还有结构光斑点,从而使 NIR 图像产生椒盐噪声,如图 6(a)所示。对 NIR 图像进行中值滤波后,利用拉普拉斯算子增强图像,如图 6(b)所示。通过对比,经滤波和增强后的 NIR 图像消除了椒盐噪声,使图像灰度更加均匀,为后续的图像匹配奠定基础。

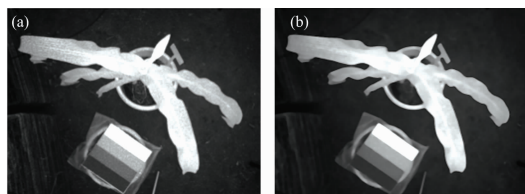


图 6 NIR 图像噪声消除

(a): NIR 图像; (b): 噪声消除后的 NIR 图像

Fig. 6 Noise elimination of NIR image

(a): NIR image; (b): NIR image after noise elimination

2.3 基于 SURF 算法的 RGB 和 NIR 图像匹配

对 RGB 和 NIR 图像进行匹配, SURF 算法提取图像特征点 645 个,并根据距离阈值对误特征点进行去除,如图 7(a)所示。然后采用 RANSAC 算法进行处理,找到 26 个特征点对,如图 7(b)所示,并计算 RGB 和 NIR 图像的变换矩阵。最后通过仿射变换对图像进行匹配对齐,如图 7(c)所示,图中的黑色是图像的平移、旋转导致的图像位置偏差。实现了 RGB 和 NIR 图像的匹配对齐,为后续开展玉米冠层叶绿素含量分布检测奠定基础。

2.4 作物目标图像分割

利用 RGB 图像的颜色特征进行作物目标图像的分割,首先 ExG 算法对图像的 G 分量进行放大,并生成灰度化因子,其次利用 OTSU 算法对灰度化因子进行阈值计算,生成如图 8(a)所示二值化掩模图像。最后用二值化掩模图像提取

RGB 图像和 NIR 图像,结果分别如图 8(b)和(c)所示。实现了玉米冠层叶片的分割,去除了花盆、土壤、杂物等背景部分,提出了作物目标图像。

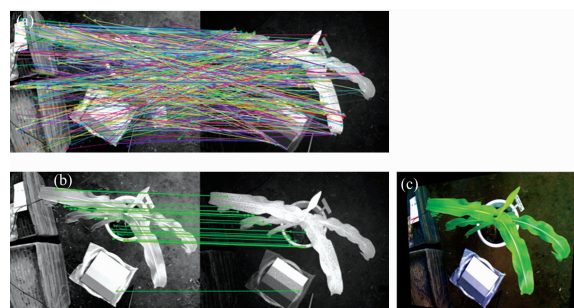


图 7 SURF 算法的 RGB 和 NIR 图像匹配

(a): SURF 算法 RGB 和 NIR 图像特征点提取;

(b): RANSAC 算法寻找最优特征点对; (c): RGB 图像仿射变换

Fig. 7 RGB and NIR image matching based on SURF algorithm

(a): RGB and NIR image feature point extraction of SURF;

(b): Finding optimal feature pairs of RANSAC algorithm

(c): Affine Transform of RGB image



图 8 作物目标图像分割

(a): 二值化掩模图像; (b): RGB 分割图像; (c): NIR 分割图像

Fig. 8 Image segmentation of crop target

(a): Binary mask image; (b): Segmentation Image of RGB;

(c): Segmentation Image of NIR

2.5 RGB 和 NIR 多光谱图像反射率校正

利用 4 阶灰度板对光饱和去除 RGB 图像 R, G, B 分量和 NIR 图像 NIR 分量进行灰度反射率校正,并建立校正模型。结果如表 1 所示,其中 NIR 分量的相关性最好达 0.994, B 分量的相关性最差为 0.745, R 和 G 分量均达到 0.82 以上。同时生成 R, G, B 和 NIR 四波段的反射率伪彩色图像如图 9(a), (b), (c)所示, G 分量的反射率要高于 R 分量和 B 分量的反射率,符合作物的在蓝光和红光区域吸收光,在绿

表 1 R, G, B 和 NIR 反射率校正模型

Table 1 Reflectance correction models for R, G, B and NIR

参数	相关系数(r)	校正模型
R 分量	0.829	$R_r = 0.899.x_r - 0.187$
G 分量	0.828	$R_g = 0.912.x_g - 0.200$
B 分量	0.745	$R_b = 1.025.x_b - 0.373$
NIR 分量	0.994	$R_{nir} = 1.191.x_{nir} - 0.231$

Note: The R_r , R_g , R_b , R_{nir} are R component, G component, B component and NIR component, reflectivity; The x_r , x_g , x_b , x_{nir} and R component, G component, B component and NIR component gray value

光区域反射光的光谱特性。

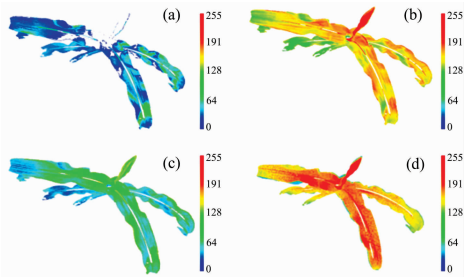


图 9 R, G, B 和 NIR 四波段的反射率伪彩色图像

(a): B 分量伪彩色图像; (b): G 分量伪彩色图像; (c): R 分量伪彩色图像; (d): NIR 分量伪彩色图像

Fig. 9 R, G, B and NIR four-band reflectivity pseudo-color images

(a): B-component pseudo-color image;
(b): G-component pseudo-color image;
(c): R-component pseudo-color image;
(d): NIR-component pseudo-color image

2.7 作物叶绿素含量指标与空间分布特性

将光饱和校正前后的 R 和 NIR 分量反射率代入式(5)中拟合图像像素叶绿素含量(P_{SPAD} 值), 并建立 P_{SPAD} 值与叶绿素仪 SPAD 值之间的拟合方程, 光饱和和校正前的拟合 R^2 为 0.332 6; 光饱和和校正后如图 10 所示, 其拟合 R^2 为 0.619 3, 拟合公式如式(6)所示, 光饱和拟合明显的提高了测量的精度。

$$y = 20.47x + 22.378 \quad (6)$$

式中 x 为图像 P_{SPAD} 值, y 为叶绿素仪 SPAD 预测值。

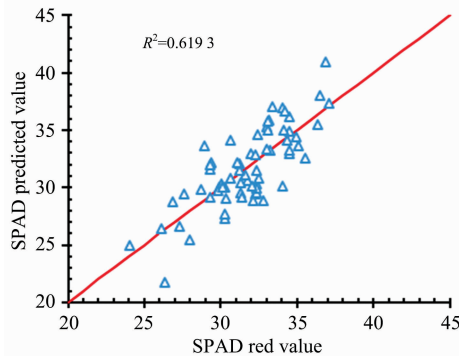


图 10 SPAD 预测值与 SPAD 测量值结果

Fig. 10 SPAD predictions and SPAD measurements

计算作物的 SPAD 特征分布图, 光饱和校正前和校正后玉米冠层的 SPAD 特征分布分别如图 11(a)和(b)所示。对比可知, 由于经过光饱和校正消除了图像的光饱和, 使基于颜色特征的图像分割更加精准, 叶绿素含量检测模型拟合精度提高, 因而经过光饱和校正的 SPAD 分布更加均匀, 且可以更好的反映叶绿素含量的分布情况。进一步观察发现, 叶片边缘叶绿素含量略高于叶脉, 这与叶片是发生光合作用的主

要场所, 而叶脉是营养输送的主要通路的生理特征相符合。说明了冠层叶绿素含量分布成像检测为作物营养评价和生理动态分析提供支持的可行性。

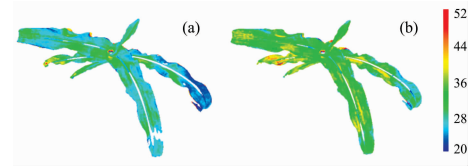


图 11 作物 SPAD 特征分布图

(a): 光饱和校正前 SPAD 特征分布;
(b): 光饱和校正后 SPAD 特征分布

Fig. 11 SPAD characteristic distribution map of crops

(a): SPAD distribution before correction;
(b): SPAD distribution after correction

尽管如此, 图中叶片的弯曲程度导致的延展性差异, 也会影响叶片图像光学特性的均一性, 未来要进一步开展作物图像光学特性与作物叶片弯曲程度相关性分析与影响剔除研究。

3 结 论

采集 RGB 和 NIR 图像, 进行了 RGB 图像光饱和和校正和 NIR 图像噪声消除。在完成 RGB 和 NIR 图像匹配的基础上, 并根据 RGB 的颜色空间特征, 采用 ExG 算法对作物目标图像进行分割。然后利用四阶灰度板对 RGB 图像的 R, G, B 分量和 NIR 图像的 NIR 分量进行反射率校正, 并建立校正模型, 生成反射率伪彩色分布图。最后通过 R 分量和 NIR 分量反射率计算 P_{SPAD} 值建立叶绿素含量指标 SPAD 拟合模型, 并绘制 SPAD 作物光谱特征分布图。主要结论如下:

(1) 通过光饱和和去除算法对 RGB 图像进行校正, 光饱和和去除前 I 分量集中在[140~180]之间, 光饱和和去除后的 RGB 图像 I 分量比 RGB 图像低, 集中在[85~130]之间, 说明光饱和和去除降低了图像的亮度, 同时去除了相机成像时产生模糊现象, 提高了 RGB 图像的清晰度。

(2) 对 RGB 图像和 NIR 图像进行了 4 阶灰度板校正, R, G, B, NIR 分量的相关系数分别为 0.829, 0.828, 0.745 和 0.994。同时生成 R, G, B 和 NIR 四波段的反射率伪彩色图像, 反射率 $R_{NIR} > R_G > R_R > R_B$, 符合作物的在蓝光和红光区域吸收光, 在绿光区域和近红外区域反射光的光谱特性。

(3) 绘制 SPAD 空间特征分布图。综合表明, 光饱和校正的 SPAD 分布更加均匀, R^2 由校正前的 0.332 6 提高到校正后 0.619 3。分析光饱和和校正后的冠层叶绿素含量指标分布图, 说明了冠层叶绿素含量指标分布成像检测为作物营养评价和生理动态分析提供支持的可行性。

除此之外, 叶片的弯曲程度影响着叶片图像指数的均一性, 未来要进一步开展作物图像光学特性与作物叶片弯曲程度的研究。

References

- [1] YANG Zhang-qing, HU Jian-dong, DUAN Tie-cheng, et al(杨张青, 胡建东, 段铁城, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农业通报), 2019, 35(7): 139.
- [2] Zhang J, Han W, Huang L, et al. Sensors, 2016, 16(4): 437.
- [3] SUN Hong, ZHAO Yi, ZHANG Meng, et al(孙红, 赵毅, 张猛, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(S2): 186.
- [4] LIU Zhen(刘振). China Printing and Packaging Research(中国印刷与包装研究), 2013, 5(1): 23.
- [5] Kober V I, Karnaukhov V N. Journal of Communications Technology & Electronics, 2016, 61(12): 1419.
- [6] DING Yong-jun, LI Min-zan, SUN Hong, et al(丁永军, 李民赞, 孙红, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(8): 175.
- [7] Wang S, Zheng J, Hu H M, et al. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(9): 3538.
- [8] HE Ming, WANG Ya-di, HE Jing(贺明, 王亚弟, 贺菁, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2013, 42(10): 2620.
- [9] XI Jia-qi, CHEN Xiao-dong, WANG Yi, et al(席佳祺, 陈晓冬, 汪毅, 等). Photoelectric Engineering(光电工程), 2019, 46(4): 47.
- [10] ZHOU Fei, JIA Zhen-hong, YANG Jie, et al(周飞, 贾振红, 杨杰, 等). Optoelectronics Laser(光电子激光), 2017, 28(5): 566.
- [11] LIU Yang, ZHANG Jie, ZHANG Hui(刘洋, 张杰, 张慧). Computerscience(计算机科学), 2018, 45(S1): 242.
- [12] Nair D, Sankaran P. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2018, 50: 9.
- [13] Zhang L, Wang S, Wang X. IET Image Processing, 2018, 12(6): 1049.
- [14] TAN Xiang, MAO Hai-ying, ZHI Xiao-dong, et al(谭翔, 毛海颖, 支晓栋, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(2): 413.
- [15] SUN Guo-xiang, WANG Xiao-yu, YAN Ting-ting, et al(孙国祥, 汪小岳, 闫婷婷, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 30(20): 187.
- [16] Fu Longsheng, Elkamil Tola, Ahmad Al-Mallahi, et al. Biosystems Engineering, 2019, 183: 184.

Spectral Imaging Detection of Crop Chlorophyll Distribution Based on Optical Saturation Effect Correction

SUN Hong¹, XING Zi-zheng¹, QIAO Lang¹, LONG Yao-wei¹, GAO De-hua¹, LI Min-zan^{1*}, Qin Zhang²

1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Center for Precision & Automated Agricultural System, Washington State University, Prosser, WA 99350, USA

Abstract Chlorophyll content is an important indicator of photosynthesis capability and nutrient content in crops. Measuring chlorophyll content of crops is considered to be the most effective method for detecting crop growth status. In this paper, a multi-spectral camera was built to capture images of maize plant in RGB(Red, Green, Blue) and NIR(Near Infrared) band, which was the fundamental for the distribution analysis of nutritional status with rapid and non-destructive method. The RGB and NIR images were acquired by image acquisition platform. Light saturation correction of RGB images based on light saturation correction algorithm was studied. The crop SPAD distribution map was established following the image matching and segmentation, image information extraction and correction. In the experiment, images of 15 maize plants were acquired by RGB-NIR camera, and 68 SPAD values were measured at different positions of the plants. Firstly, the RGB images were corrected by light saturation correction algorithm. At the same time, the NIR images were filtered and enhanced. Secondly, the RGB and NIR images were matched with SURF (Speeded-Up Robust Features) and RANSAC (Random Sample Consensus) algorithm. Used RGB images color feature, the mask was generated with ExG (Extra Green) and OTSU algorithm, and applied in the RGB-NIR images segmentation. The R, G, B and NIR components of the image were extracted and the reflectance were corrected by the fourth-order gray-scale plate. The Intensity(I) component histogram and crop SPAD value distribution were compared to verify the effect of the optical saturation correction algorithm. The results show that I component of RGB image concentrates between [140~180] before optical saturation correction, and between [85~130] after optical saturation correction because of correction in image blurring and RGB image saturation. The correlation coefficients between the image components (R, G, B, NIR) and gray

scale reflectance were 0.829, 0.828, 0.745 and 0.994, respectively. Then the pseudo-color images of R, G, B and NIR bands were generated. The reflectance results ($R_{\text{NIR}} > R_{\text{G}} > R_{\text{R}} > R_{\text{B}}$) indicated the spectral characteristics of crops which absorbed light in blue and red regions, reflected light in green and near infrared regions. Thirdly, the SPAD values at pixel level were calculated. The accuracy of chlorophyll content fitted in SPAD formula with R and NIR component reflectance before and after correction were compared. The R^2 was 0.332 6 before correction and the R^2 after correction was 0.619 3. Finally, the SPAD distribution map of crops was drawn, which could provide technical support for analyzing and monitoring the nutritional distribution of crops.

Keywords Light saturation correction; Multispectral analysis; Crop detection; Chlorophyll distribution; Image processing

(Received May 27, 2019; accepted Sep. 21, 2019)

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社