用于植物病虫害诊断的多光谱成像系统

冯 $洁^{1,2}$, 廖宁 \hbar^{1} , 梁敏勇¹, 赵 \ddot{w}^{2} , 戴志福³

1. 北京理工大学颜色科学与工程国家重点专业实验室,北京 100081

2. 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650092

3. 红河学院, 云南 蒙自 661100

摘要准确重建被测目标的颜色信息对实现可靠的植物病虫害诊断具有十分重要的意义。文章提出把多光谱成像技术应用于植物病虫害诊断,所采集的多光谱图像可以从光谱维和图像维反映被测目标的特征信息。在此基础上,实验采用 16 个窄带滤色片、单色面阵 CCD、积分球混合光源照明和标准观测环境建立了能进行适时、无损检测的多光谱成像系统。并利用该设备对 Macbeth 色卡中 8 个色卡进行光谱和颜色重建, 重建的结果与光谱辐射度计的测量结果进行了比较。通过对光谱匹配角度和 CIE 标准色差分析,证明这种多光谱成像系统能够准确、稳定地重建出目标的光谱信息和颜色信息。

关键词 多光谱成像;光谱反射率;颜色重建;植物病虫害 中图分类号:O432.3 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn 1000-0593(2009)04-1008-05

引 言

园艺作物长期以来在农业产品中占很大比重。病虫害一 直是制约着园艺作物生产的主要因素。传统的诊断方法是采 用 R CB 彩色相机捕获的图片与患病害的植物进行比较^[1,2]。 这种方法有两方面的原因不利于实现可靠的诊断:一是测试 目标的颜色依赖于图像捕获位置的照明条件,如果图像捕获 位置的照明条件发生改变,目标的颜色也会发生变化;二是 传统 R CB 三原色相机的颜色重建精度远远不能满足实际的 检测。此外,植物表面的颜色信息并不能完全体现植物内部 病害的变化。

多光谱成像技术结合了空间成像系统和光谱探测系统的 功能,可以同时从光谱维和空间维获取被测目标的信息,因 此近年来在信息获取与处理领域备受重视^[35]。在农业工程 的应用中,多光谱成像技术主要体现在作物病害诊断^[6]、农 产品品质检测^[7]、作物生长状态监测等^[8]。

有鉴于此,本文介绍了植物病虫害多光谱成像的系统原型,并以园艺植物叶面的病虫害为研究对象,通过采集病害 植株的多光谱图像,重建光谱信息和颜色信息,与 PR-715 光谱辐射度计进行比对。实验结果说明多光谱成像系统在植物病虫害的诊断方面优于传统的诊断方法。

1 多光谱成像技术

1.1 多光谱图像

一幅多光谱图像是由一系列的灰度图像组成的,而每个 灰度图像都是在一个很窄的波段获得^[9]。可以将多光谱图像 看作一个三维数据立方体,二维的图像记录了样本的形态信 息,第三维坐标则记录光谱信息。并且每一个象素都有唯一 对应的光谱曲线。因此一幅多光谱图像不仅可以获取目标的 空间信息同时可以反映每个象素点的光谱信息。

1.2 颜色重建的方法

颜色是由光谱信息来计算。假设照明光源是空间均匀 的,设在图像捕获位置照明光源的光谱贡献为 E_i()。如果 获得目标独立于设备的颜色三刺激值,在经过标定的显示器 上就能重建出目标的颜色^[10]。CIE 色度系统颜色的 XYZ 三 刺激值 t_i 可用以下公式计算

$$t_i = \overline{t_i}(\) E_1(\) f(\) d \tag{1}$$

式中 $\overline{t_i}(\cdot)$ 为 CIE1931 颜色匹配函数, $f(\cdot)$ 为物体的光谱反 射率函数。

在实际计算中用求和来近似积分

$$t_i = k \qquad E_1() f() \overline{t_i}() \qquad (2)$$

式中 k 为归一化系数,由下式求得

收稿日期: 2007-12-12, 修订日期: 2008-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(60678052,60768002)和国家"863 "基金项目(2006AA10Z210)资助 作者简介:冯 洁,女,1975年生,北京理工大学颜色科学与工程国家重点专业实验室博士研究生 e-mail:fengjie_ynnu@yahoo.com.cn

$$k = \frac{100}{E_1(\cdot) \overline{y}(\cdot)} \tag{3}$$

由(1)式可知,在任意的照明条件下如果已知光谱反射 率函数 f(),则可求得 ti。为了能正确估计反射率函数 f(),在此提出用比较测色法^[11]获得被测样品的光谱反射 率。

2 多光谱成像系统

2.1 多光谱成像系统组成

为了能进行实时无损的植物病虫害多光谱图像采集,实验设计的多光谱成像系统如图1所示。系统主要由图像输入

单元、图像处理单元和图像输出单元3部分组成。图像输入 单元由多光谱相机、相机控制模块和照明结构组成。图像处 理单元由光谱处理模块、颜色处理模块和数据存储模块组 成。图像输出单元是由显示标定模块组成。

2.2 多光谱相机

多光谱相机由一个分辨率为1280×1024的8位单色面 阵CCD加上成像装置组成,前面放置16片窄带滤色片。滤 色片半带宽为10nm,中心波长分别是367,400,4348, 460,490,515.7,530,546,589,600,620,635,650,670, 700,850nm。滤色片的透过率利用Lambda19分光光度计 进行测量,见图2。



Fig. 1 Multispectral imaging system



2.3 照明光源的设计要求

如何获得空间均匀的照明光源,有效排除测量病害叶面 的表面结构的影响,是利用多光谱图像进行准确颜色重建的 关键因素之一。因此首先必须探究照明和观测的环境。在实 验中,多光谱成像系统观测的几何条件采用 CIE1931 年正式 推荐的 d/0(漫反射/垂直)照明和观测条件。积分球采用混合 光源照明:选用发光特性接近 A 光源的卤钨灯,用荧光灯模 拟 D65 光源。图 3 是利用 PR-715 光谱辐射度计测量的设备 光源的光谱辐射度与波长的关系。

3 实验与结果分析

3.1 反射率数据标定

7

为了消除 CCD 的响应特性和滤色片的透过率对图像采 集质量的影响,准确地将不同通道条件下的叶面图像数据转 换为叶面的反射率数据,需要对无光泽的平面白色样板进行 标定。首先通过灰度值调节每个波段合适的曝光时间,然后 使用计算好的曝光时间再次采集白板各波段的光谱图像,所 得到的白板光谱图像将用在光谱反射率重建的校正中。



Fig. 3 Spectral distribution of the lamps

3.2 系统数据重建分析

为了实现对多光谱图像数据的准确重建,本文采用多光 谱成像系统对已知光谱信息和颜色信息的目标进行数据重建 分析。实验选择 Macbeth 色卡中 Red, Blue, Green, Orange, Foliage, Yellow Green, Neutral8 和 Neutral3.5 共 8 个颜色作 为测试样本。重建分为两部分,第一部分是光谱反射率重 建,第二部分是颜色重建。

色卡光谱反射率重建:首先采用 PR - 715 光谱辐射度 计,在标准灯箱 A 光源下,从 400 ~ 700 nm 每隔 5 nm 对色 卡进行采样,获取 8 个色卡的光谱反射率值。接下来用多光 谱成像系统采集 8 个色卡的多光谱图像,利用图像重建单元 从 400 ~ 700 nm 每隔 5 nm 重建色卡的光谱反射率曲线。最 后采用(4)式提出的光谱角度匹配法测量多光谱系统对目标 的光谱曲线重建效果,计算的结果见表1。

式中: *SA* 为两条光谱矢量间 $s = [s_1, s_2, s_N]^T$ 和 $t = [t_1, t_2, t_N]^T$ 的夹角, *N* 为波段数。*SA* 的值域为[0, /2], 0 表示两个光谱向量完全一致, /2 表示两者完全不相似。

Table 1 Spectral match angle

色卡	SA/(9	色卡	SA/()
Red	6.73	Yellow Green	7.31
Blue	11.77	Foliage	14.05
Green	14.92	Neutral 8	3. 36
Orange	6.60	Neutral 3. 5	3.46

从光谱角度 *SA* 可以看出,与 PR-715 光谱辐射度计的 测量结果比较,从 400~700 nm 共用 14 个通道的多光谱图 像准确重建出色卡的光谱反射率曲线。

色卡颜色重建:利用重建出的光谱反射率值,根据(2) 式可以得到色卡 CIEX YZ 三刺激值,进而转换得到 $L^*a^*b^*$ 颜色空间的色度坐标值。图 4 显示了 8 个色卡在 $L^*a^*b^*$ 颜 色空间 a^*b^* 值的分布。为了衡量颜色重建的质量,实验利 用 CIE1931 色差公式

$$E_{\rm ab}^{*} = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}}$$
(5)

计算 PR-715 光谱辐射度计的测量结果和多光谱系统重建颜 色的色差。同时也计算了 PR - 715 光谱辐射度计的测量结果 与普通数码相机的色差。计算的结果见表 2。



Fig. 4 Results of the color reproduction

 Table 2
 CIE L * a * b * color different

	Reproduction	3-band image
Ave.	7.19	19. 40
Max.	13. 77	37. 79
Min.	1. 25	11.82
Std.	4.86	9.11

2

在颜色测量中, E_{ab}^{*} 小于 1 是人眼视觉不可察觉的色差,而 E_{ab}^{*} 小于 3 认为是人眼视觉可察觉的色差⁽¹²⁾。从表 3 的结果可以看出,多光谱系统颜色重建的平均色差 $E_{ab}^{*} =$ 7.19,最大色差 $E_{ab}^{*} =$ 13.77。一个物体的颜色是物体的反射率、照明光源的光谱贡献和探测系统的光谱响应组成。由于多光谱成像系统的照明光源并不是标准的 A 光源,而且多光谱成像系统的 CCD 响应与 PR-715 光谱辐射度计的 CCD 不一致。这两个因素是造成较大色差的主要原因。但是,在相同照明条件下多光谱成像系统重建的精确度优于传统的 R GB 三通道相机。

4 应 用

实验选取无病的健康黄瓜叶面和患有霜霉病害 (Pseudoperono spora cubensis)的黄瓜叶面进行分析。黄瓜霜霉菌株 来源于中国农业科学院综合防治课题组。从4 冰箱中取 出,在 PDA 上活化后,把病菌株转至 PDA 上培养一定的时 间,大量产孢后将孢子刷下,配成浓度为2 ×10⁶ 个 mL 的孢 子悬浮液,采用喷雾接种方法将孢子悬浮液接种于健壮的黄 瓜叶部,保湿 24 h 后正常管理,直至显示出明显典型症状。 然后将其放置在多光谱设备中分别采集 16 个波段的光谱图 像。图 5 是采蒋到的 16 幅多光谱图像。



Fig. 5 16 narrow bands multispectral images of diseased leaves

在获得黄瓜叶面的多光谱图像后,利用图像处理单元重 建出彩色图像,图6是图像输出单元的输出结果。同时,我 们对霜霉病斑区域和健康叶面区域各取10个样本的平均值, 重建它们的光谱反射率曲线。图7是重建后的结果。从图中 可以看出,在400~700 nm的可见光范围内,黄瓜叶面重建 的光谱反射率曲线随着叶面病害的变化呈现较大的区别。对 于正常的叶面,670 nm为中心的红波段吸收谷和540 nm 附 近的绿色反射峰准确呈现绿色植物的光谱特征。当黄瓜叶面 受到霜霉病害的侵蚀,叶绿素含量发生变化。重建的曲线准 确反映出叶绿素在蓝、红波段的吸收减少反射增强,特别是 红反射率上升,在可见光波段整体反射率大于健康叶面。



Fig. 6 Color reproduction of diseased leaves

从以上的应用可以看出,多光谱成像系统与普通成像系统相比,具有的优点是:多光谱图像除了保留目标的图像信息外,还获取了目标的光谱信息,为识别提供了很多有价值的特征;有效解决照明环境改变带来的颜色变化。把探测的波段由 380~780 nm 的可见光波段拓宽到近红外和紫外波段。

5 结 论

本文提出了基于光谱成像技术的植物的病虫害诊断方



Fig. 7 Spectral reflectance reproduction of cucumber leaves 1: Health; 2: Diseased

法。在此基础上,用 16 个窄带滤色片、单色面阵 CCD、积分 球混合光源照明和标准观测环境建立了一套相应的多光谱成 像系统。和传统诊断方法相比较,多光谱成像技术除了保留 植物的图像信息,还获取了目标的光谱信息,并且把诊断的 范围从可见光波段扩展到紫外和近红外波段,为识别提供了 更有价值的信息。实验证明,本文设计的多光谱成像系统颜 色重建的色域宽,设备的重复精度高。为实现对植物进行快 速、准确和非破坏性诊断提供可靠的技术支持。

[1] LI Zhi-gang, FU Ze-tian, LI Li-qin(李志刚, 傅泽田, 李丽勤). Transactions of Chinese Society of Agricultural Machine(农业机械学报), 2005, 36(8): 143.

文

献

- [2] CUI Yan-li, CHENG Peng-fei, DONG Xiao-zhi, et al (崔艳丽, 程鹏飞, 董晓志, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2005, 21: 32.
- [3] Levenson R M, Hoyt Clifford C. American Laboratory, 2000, 32(22): 26.
- [4] Yu Zhumar A. International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1999, 2: 794.
- [5] Yamaguchi Masahiro, Teraji Taishi. SPIE, 2002, 4663: 15.
- [6] FENGLei, FANGHui, ZHOU Wei-jun, et al (冯 雷, 方 慧, 周伟军,等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1749.
- [7] CHEN Xiang-wei, YUE Tian-li, YANG Gong-ming(陈香维, 岳田利, 杨公明). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2006, 22(8): 240.
- [8] LI Ying xue, ZHU Yan, DAI Ting bo, et al (李映雪, 朱 艳, 戴廷波, 等). Chinses Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 2006, 17(8): 1443.
- [9] GUO Ning ning, ZENG Li-bo, WU Qiong shui, et al (郭宁宁, 曾立波, 吴琼水, 等). Computer Engineering and Application (计算机工程与应用), 2005, 41: 171.
- [10] Berns R. Color Technique Theory(颜色技术原理). Translated by LI Xiao-mei(李小梅,译). Beijing: Chemical Industry Press(北京:化 学工业出版社), 2002. 50.
- [11] TANG Shum-qing(汤顺青). Colorimetry(色度学). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京:北京理工大学出版社), 1999. 154.
- [12] Vrel M J, Tressell H J. Color Res. And Appl., 1992, 17(5): 328.

Multispectral Imaging System for the Plant Diseases and Insect Pests Diagnosis

 ${\sf FEN}\,{\sf GJie}^{1,\,2}$, LIAO Ning-fang 1 , LIAN G ${\sf Min}$ yong 1 , ZHAO Bo 2 , DAI Zhi-fu 3

1. National Laboratory of Colour Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Department of Physics and Electronics, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China

3. Honghe University, Mengzi 661100, China

Abstract For a reliable diagnosis of plant diseases and insect pests, it is very important to reproduce the original color of the object. But it is not certain by conventional color imaging systems. Multispectral imaging techniques are capable of providing additional useful spectral information of common pathological samples using image acquisition. The authors present a multispectral imaging system for the diagnosis. This system uses 16 narrow-band filters, a monochrome CCD camera, and standard illumination environment. Spectral match angle and color difference can be obtained through measurements and analysis of 8 Macbeth color patch using PR-715 spectraScan and multispectral imaging system. In addition, the color image and spectral reflectance of cucumber diseased leaves were reproduced using the multispectral imaging system. In the experiment, it was confirmed that the system realized good accuracy in the color reproduction and spectral reflectance reproduction from a limited number of color bands.

Keywords Multispectral imaging; Spectral reflectance; Color reproduction; Plant diseases and insect pests

(Received Dec. 12, 2007; accepted Mar. 26, 2008)