

文章编号: 1005-5630(2015)02-0132-06

基于薄膜干涉分光技术的便携式多光谱成像系统

吕少波, 雷 鹏, 张勇喜, 吴增辉, 胡雯雯

(沈阳仪表科学研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘要: 基于薄膜干涉分光技术开发了多光谱图像采集分析系统样机, 样机由分光滤光片、CCD相机、逻辑控制组件和计算机终端软件等组成, 并在农产品检测、成分检测等方面开展了多光谱检测技术的实验研究。实验表明, 多光谱成像系统能够进行高分辨率的光谱图像采集, 并进行光谱重建和聚类分析。在农产品检验中利用多光谱成像技术能够将霉变的黄豆与优质黄豆进行快速区分; 在电解液浓度和成分检验中能够将不同浓度或不同成分的液体进行识别; 在笔墨检验中能够将不同油墨的笔迹进行准确有效地判别。

关键词: 薄膜干涉; 带通滤光片; 多波段; 光谱成像

中图分类号: O 438 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.02.009

Portable spectral imaging system based on film interference band-pass technique

LÜ Shaobo, LEI Peng, ZHANG Yongxi, WU Zenghui, HU Wenwen

(Shenyang Academy of Instrumentation Science Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

Abstract: One type of multi-spectrum imaging system based on film interference technique is discussed. A prototype of multi-spectrum imaging machine is developed, which consists of a band-pass filter, a CCD, logic control components and computer analysis software. Experiments such as inspection of agricultural products and physical composition are carried out. The result shows that the imaging system can realize spectral image acquisition at a high resolution and analyze the reflectance spectrum reconstruction and image classification accurately. The system is also applied in the inspection experiment of mouldy beans, electrolyte composition and density, and scribbled signatures with different pens.

Keywords: film interference; band-pass filter; multi-band; spectral imaging

引 言

多光谱成像技术是结合图像技术与光谱分析技术的新型光电检测分析技术, 既可通过图像获得物体的形状、位置等物理信息, 又可通过光谱分析获得物质组分、结构及化学成分等信息。近年来, 由于其强大的检测分析能力, 在航空遥感、自动控制、环境监测、食品安全、医疗卫生、农业、考古鉴定等领域获得广泛的应用。

收稿日期: 2014-08-04

基金项目: 沈阳仪表科学研究院有限公司科研基金项目(Y1020-71)

作者简介: 吕少波(1980—), 男, 工程师, 主要从事薄膜光学研究。E-mail: lvshaobo@hb-optical.com

国外关于多光谱技术的发展始于20世纪80年代,主要应用于航空航天等环境与资源遥感领域。典型的多光谱产品有: Xybion Electronics公司开发的旋转滤光片轮式 CCD多光谱相机系统^[1]; 亚琛工业大学的16波段窄带滤光片多光谱实验装置^[2]; USDA-ARS公司研制的 CCD航空自然探测数字视频系统 ADVIS^[3]; Z/I影像公司的复合 CCD面阵式 DMC2001数字航空多光谱摄像机系统^[4]等。我国的光谱成像技术始于20世纪90年代并在航空遥感领域取得突破性进展,主要表现在机载传感器的研制方面,如国家863计划308主题推出的先进机载对地观测系统(AEOS)以及现在资源1号、资源2号搭载的对地光谱成像系统。

上述的光谱成像技术大多应用于航空航天对地观测或实验室科学研究领域,设备系统复杂,使用要求稳定性很高且专业性很强,故其在民用领域的推广应用程度很低。因此,本文在滤光片分光技术基础上开展基于薄膜干涉分光技术的多光谱成像技术研究,整套技术和设备具有结构简单、便携易用的特点,并在农产品检测、物质成分检测等方面进行多光谱成像技术的实验研究。

1 多光谱成像系统的设计

1.1 多光谱成像系统原理

图1为多光谱成像原理图:由自然光或照明光源照射的目标物体经镜头成像在位于像平面的 CCD面阵上,该图像包含了目标物体对当前滤光片中心波长光谱反射率的特征。通过更换不同中心波长的带通滤光片,可获得一系列连续的光谱图像数据。光谱图像的每一个像素都代表了物体上的某一微小区域,通过反演所有光谱图像上该区域像素的响应值,即可得到目标物体该点的光谱数据。物质由于组成成分不同都有各自的特征光谱,因此可以用多光谱技术对目标进行检测、识别^[5]。

图2为本文多光谱成像系统配备的部分带通滤光片的光谱透过率曲线,滤光片中心波长涵盖400~1 000 nm波段,透射光谱半宽约30 nm,透过率80%~90%,截止背景在OD4(光密度值)以下,所有滤光片均为自行设计并制造。

1.2 多光谱成像系统构成

本文设计的基于薄膜干涉滤光片的多光谱成像系统主要包括以下几个部分:

(1) 光谱分光组件

将不同中心波长的窄带带通滤光片组成滤光片轮,转动滤光片轮更换滤光片以获得不同波段的光谱图像。滤光片为可拆卸设计以满足不同实验目的的波段配置,且其高透高截止特性能够提高信噪比,保证图像质量。

(2) 图像采集组件

成像镜头为 VS-0880M 百万像素级变焦镜头,焦距为8~50 mm,适用 CCD 成像面阵尺寸 1/2 in (1 in=2.54 cm); CCD 为 MV-VD120SMSC 单色相机,光谱响应范围为400~1 000 nm,成像面阵尺寸 1/2 in,最大分辨率 1 280 pixel×960 pixel,帧速率 15 帧/s,数据位数 8 bit。

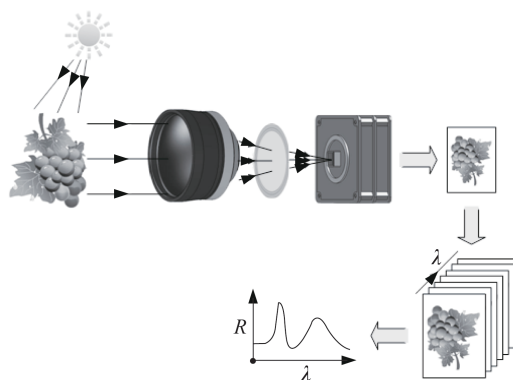


图1 多光谱成像系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-spectrum imaging system

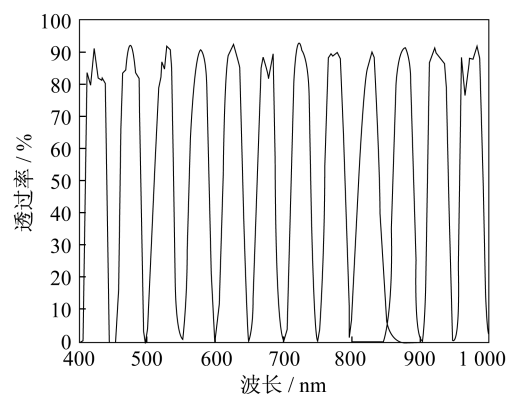


图2 带通滤光片透过率曲线

Fig. 2 Spectral transmittances of band-pass filters

(3) 逻辑控制组件

驱动滤光片轮盘旋转的步进电机系统由电源适配器、逻辑控制单片机(本文采用 89C51 单片机)、电机驱动器、电机等组成,单片机中设计了一系列步进电机控制指令以方便单片机与上位机之间的通讯。

(4) 计算机终端控制及光谱图像处理分析系统

基于单片机编程和 CCD 附带的 SDK 开发包,设计滤光片更换和 CCD 图像采集的逻辑控制程序。多光谱图像采集完成后,编写相应的算法和程序对图像进行配准、光谱特征重建、图像标定等工作。

基于上述组件设计的多光谱图像采集系统样机如图 3 所示,样机设置有若干圆形滤光片孔位,可更换任意中心波长的带通滤光片。系统通过 USB 接口以及 COM 接口与计算机连接,其中 USB 接口为 CCD 传感器接口,用于图像或视频采集,COM 接口为单片机控制板接口,用于计算机与单片机之间的数据通讯,通过发送单片机控制指令实现步进电机的驱动和单片机反馈信息的读取。

计算机终端控制及光谱图像处理分析系统通过 MATLAB 软件的 GUI 程序设计实现,程序界面如图 4 所示,主要功能包括系统逻辑控制及图像采集、光谱图像预处理、建立图像数据立方体、反射光谱重建、光谱图像聚类 and 标定等。



图 3 基于带通滤光片的多光谱成像系统
Fig. 3 Multi-spectrum imaging system with band-pass filters

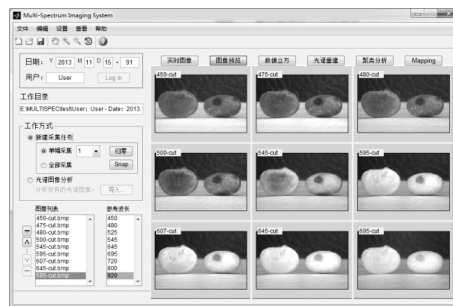


图 4 多光谱成像系统软件界面
Fig. 4 Graphical user interface of multi-spectrum imaging software

1.3 多光谱图像信息处理

(1) 光谱图像预处理

首先,由于成像镜头、滤光片等光路传输的非线性以及 CCD 自身存在的高斯白噪声和暗电流等的影响,造成光谱图像存在孤立的亮点、暗点等图像噪声,降低了图像质量,因此需对光谱图像进行图像滤波降噪处理^[6]。本文采用双边滤波^[7]进行图像噪声滤除,既能达到有效的降噪效果,又可以保留图像的边缘信息。其次在多光谱实验过程中,根据实验目的需更换不同通带波长的滤光片,导致系统与物体相对空间位置发生变化,多光谱图像之间存在位置偏移,这时需对多光谱图像进行配准。本文采用基于互信息测度的图像配准方法,一维搜索策略采取了 Powell 优化算法,图像空间变换基于双线性 PV 插值法进行像素插值,图像的配准精度可达到亚像素级^[8-9]。

(2) 表面反射光谱重建

本文基于最小二乘回归法进行反射光谱重建^[10-11],考虑到系统的非线性以及暗电流噪声对成像的影响,将在图像上提取的第 i 个特征点处的 CCD 响应 u 进行二阶多项式扩展

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = [u_1, u_2, \dots, u_C] \\ \tilde{\mathbf{u}}_i = [1, u_1, \dots, u_C, u_1^2, u_1 u_2, \dots, u_1 u_C, u_2^2, u_2 u_3, \dots, u_2 u_C, \dots, u_{C-1} u_C, u_C^2] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tilde{\mathbf{u}}_i$ 为扩展后第 i 特征点的响应值向量; C 为通道数。若在图像上共提取了 L 个特征点,则这些点的响应值扩展矩阵为

$$\tilde{\mathbf{U}} = [\tilde{\mathbf{u}}(1), \tilde{\mathbf{u}}(2), \dots, \tilde{\mathbf{u}}(L)] \quad (2)$$

因此,CCD 响应值到物体光谱反射率 \hat{r} 的转换矩阵 W 为^[10]

$$W = R\tilde{U}^T(\tilde{U}\tilde{U}^T + \lambda I)^{-1} \quad (3)$$

式中: R 为实际反射率; I 为单位矩阵; λ 为常数。第 i 特征点处光谱反射率重建为

$$\hat{r}_i = Wu_i \quad (4)$$

转换矩阵 W 通过 colorchecker SG 色卡的颜色样本进行标定。

(3) 反射光谱相似性判定与多光谱图像分类

重建的物体表面光谱反射率的相似性通过向量相关系数进行判定^[12-13],对于光谱向量 x 和 y 其相关系数定义为

$$\sigma(x, y) = \frac{(x - \bar{x})^T(y - \bar{y})}{[(x - \bar{x})^T(x - \bar{x})(y - \bar{y})^T(y - \bar{y})]^2} \quad (5)$$

式中 \bar{x} 和 \bar{y} 为两向量的平均值。

2 多光谱成像技术实验研究

基于本文的多光谱成像系统,首先对 colorchecker SG 标准色卡进行了光谱图像的采集和分析,所选实验样本为色卡中央的 96 个色块。使用 Avantes 光纤光谱仪对各样本进行实际反射率的测量,然后在自然光照条件下进行各波段光谱图像的采集,色卡多光谱图像的数据立方体如图 5 所示。以其中的 64 个色块为训练样本,利用本文的多光谱图像处理软件对光谱反射率重建矩阵进行训练求解,以剩余的 32 各色块为校验样本进行光谱反射率重建的验证。图 6 为某一色块的反射光谱重建结果,可以看出重建的反射光谱与测量得到的光谱反射率吻合较好,说明本文设计的多光谱成像系统能够适用于光谱成像分析的应用。

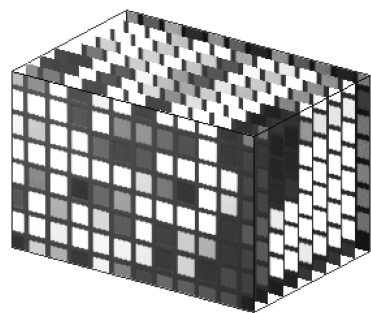


图 5 色卡多光谱图像的数据立方体

Fig. 5 Data cube of color-board multi-spectrum images

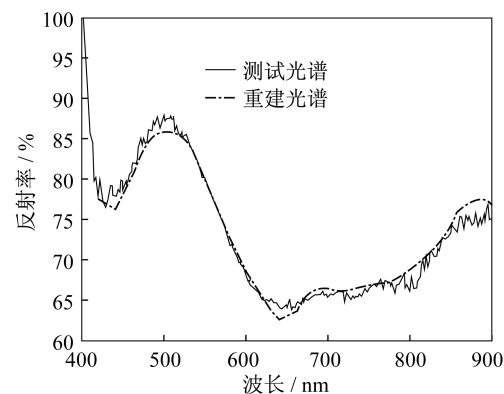


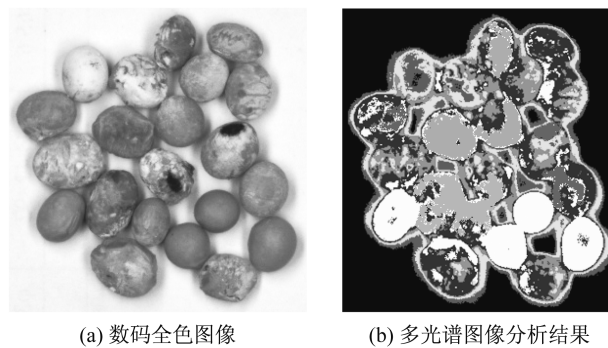
图 6 某样本的光谱重建结果

Fig. 6 The estimated spectral reflectance of one sample

在本文的多光谱成像分析实验中,需人为地将图像所包含的内容区分为若干个特征区域,并在每一个区域选择一个特征点进行光谱反射率的重建,然后根据重建的反射光谱的相关性(设定相关系数阈值,本文为 0.93)对图像上所划分的特征区域进行区分,进而完成对多光谱图像的特征分类和标定。以下为利用多光谱成像系统进行的实验及其分析结果。

(1) 霉变黄豆的检验

在自然光照条件下,对霉变的黄豆进行多光谱检测实验,检测图像如图 7 所示。图 7(a)为 CCD 获得的全色图像,其中部分霉变的黄豆与优质黄豆像素对比度较差,难以快速地进行识别;然后使用本文的多光谱成像系统进行图像采集,并进行光谱聚类分析后的图像如图 7(b)所示,此时优质的黄豆(白色部分)能够清晰地识别出来,从而可以进行快速筛检。



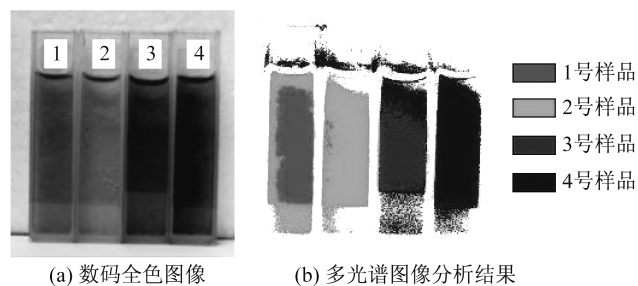
(a) 数码全色图像 (b) 多光谱图像分析结果

图 7 霉变的黄豆多光谱检测实验

Fig. 7 Moldy beans detection using multi-spectrum imaging system

(2) 电解液质量分数区分

图 8 为某电解沉积实验室提供的四种不同类型电解液的多光谱成像分析实验及结果,样品编号为 1~4 的四种电解液从左至右分别为:电解沉积后的废弃液体;未电解沉积的新配制液体;比 2 号样品质量分数高 10% 的钴离子液体;比 3 号样品质量分数高 10% 的钴离子液体(出于技术保密,该实验室并未提供详细的电解液配方)。在图 8(a)全色图像中,1、2 号样品均为绿色,且 2 号样品颜色稍浅,而 3、4 号样品为墨绿色且肉眼难以区分。经本文多光谱成像系统进行光谱图像采集并分析后的结果如图 8(b)所示,通过重建各溶液的反射光谱能够快速准确地将四种电解液区分开来。



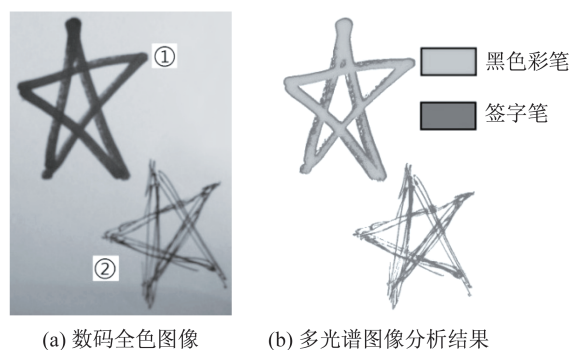
(a) 数码全色图像 (b) 多光谱图像分析结果

图 8 电解液成分及浓度多光谱检测实验

Fig. 8 Composition and density inspection of liquid electrolyte using multi-spectrum imaging system

(3) 笔迹检验

图 9 为两种不同油墨的笔迹检测试验,两支笔分别为普通签字笔和黑色彩笔,且均为黑色。实验前,先用普通签字笔画出①、②两个星并重复描粗,然后使用黑色彩笔将①号星涂抹覆盖。在数码全色图像图 9(a)中,两种笔迹均为黑色,不能区分。图 9(b)为本文多光谱成像系统进行光谱图像采集并分析后的结果,可以看出,在①号星中黑色彩笔并没有将普通签字笔所画星形完全涂抹覆盖,笔画边缘仍显示签字笔的线条,且这些线条的识别结果与②号星普通签字笔的笔画一致,验证了本文多光谱成像系统对油墨识别的正确性。



(a) 数码全色图像 (b) 多光谱图像分析结果

图 9 两种笔墨的多光谱识别实验

Fig. 9 Distinguish between two different ink using multi-spectrum imaging system

3 结 论

基于薄膜干涉滤光片开展多光谱成像技术研究,设计试制多光谱图像采集分析系统样机,并基于MATLAB软件平台编写了多光谱图像信息处理软件。通过标准色卡 colorchecker SG 多光谱图像采集分析实验,表明本文的多光谱成像系统能够进行准确的光谱图像采集,并进行光谱和图像信息聚类。在黄豆霉变的农产品检测实验中,本文的多光谱成像系统能够进行有效的霉变识别,实现农产品快速筛检。在电解液检测实验中能够将不同浓度和成分的液体进行快速区分,为生产工作提供技术支持。笔迹检测实验能够对不同成分的油墨进行区别,可在刑事刑侦领域提供有效的侦查手段。多光谱图像采集分析系统的其他应用,如烟气排放的环境检测、食品安全等,有待于在日后的工作中进行更加深入的研究。

参考文献:

- [1] NIEDRAUER T, PAUL C. A portable multispectral video system[C]//OCEANS'85-Ocean Engineering and the Environment. San Diego, CA, USA: IEEE, 1985: 304-307.
- [2] HILL B. The history of multispectral imaging at Aachen University of Technology[EB/OL]. Spectral Vision, 2002. <http://www.it.rwth-aachen.de/Inhalt/Documents/Hill/AachenMultispecHistory.pdf>.
- [3] ESCOBAR D E, EVERITT J H, NORIEGA J R, et al. A twelve band airborne digital video imaging system(ADVIS)[J]. Remote Sensing of Environments, 1998, 66(2): 122-128.
- [4] HINZ A, HEIER H. The Z/I imaging digital camera system[J]. The Photogrammetric Record, 2000, 16(96): 929-936.
- [5] 万会江. 多光谱成像系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [6] 徐林丽, 许海滨, 冯洁, 等. 非线性偏微分方程增强多光谱图像清晰度[J]. 光学仪器, 2014, 36(3): 213-218.
- [7] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision. Bombay, India: IEEE, 1998: 839-846.
- [8] 杨绪超. 基于二阶互信息的多光谱图像配准算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [9] 陈显毅. 图像配准技术及其 MATLAB 编程实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [10] 施翠翠. 基于多光谱成像的光谱反射率重建及应用[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [11] 张哲超. 成像系统中的光谱反射率重建[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [12] 戴春妮. 高光谱显微图像的特征提取与分类方法及其应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [13] 林立波, 李宏宁, 曹鹏飞, 等. 用 LCTF 光谱技术提取甘蓝小菜蛾虫害叶片特征波段[J]. 光学仪器, 2014, 36(3): 194-197.

(编辑: 刘铁英)