

基于数字滤波的主动式高光谱 成像系统及其波长标定

李 婧, 王蕴珊, 司书春, 徐建强, 高成勇, 周灿林
(山东大学 物理学院, 山东 济南 250100)

摘要:基于数字滤波技术,提出了获取物体反射光谱数据立方体和光谱响应曲线的主动式新型高光谱成像系统。对传统WDF型瓦兹渥斯反射式单色仪进行了改装,在入射光一定的情况下,增大出射光通量,提高了照射在物体表面的光强。利用数字滤波方式代替光学窄带滤波器,解决了多个光学滤光片不能连续可调和其他滤波器成本高的问题,建立了波长连续可调,带宽可调的高光谱成像系统。针对系统的特点和采集方式,提出了适当的定标方式,其波长误差 $<2\text{ nm}$ 。得到了绿色树叶效果良好的光谱数据立方体和响应曲线,表明提出的系统适用于实验室中小视场内的光谱成像测量研究。

关键词:高光谱成像;数字滤波;波长定标;光谱图像

中图分类号:TH74; TP391 **文献标识码:**A

Active hyperspectral imaging system based on digital filtering and its calibration

LI Jing, WANG Yun-shan, SI Shu-chun, XU Jian-qiang, GAO Cheng-yong, ZHOU Can-Lin

(*School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China*)

Abstract: A novel active hyperspectral imaging system in which a digital filter is specially designed as a creative component is developed for calculating the spectral cube and spectral response of an object. Based on the refit of a general WDF Wadsworth monochromator, the system enhances the exit flux and improves the optical intensity radiated on the object when the light incident keeps a constant. Furthermore, the optical narrowband filter is replaced by a digital filter. The hyperspectral imaging system resolves the problem of the system with a number of optical filters which can not be adjusted continuously, and it has lower cost than other filters. Meanwhile, the system is easy to implement, wavelength tunable, and band variable. According to the characters of the system and image gathering, the calculation method is supplied and the inaccuracy is less than 2 nm. The spectral cube and response of green leaves are successfully achieved, and the system is suitable for the spectral measurements with a small view in laboratory.

Key words: hyperspectral imaging; digital filtering; wavelength calibration; spectral image

1 引言

光谱成像技术是利用物体在不同波段响应不同的特点,对物体进行物质检测、遥感监控、显微成像的成像分析技术^[1]。光谱成像系统根据采集图像的方式不同,可分为:掸扫式、推扫式、凝采式3种。凝采式光谱成像系统多采用单色器或者电动可调滤波器实现光谱通道的切换,在切换过程中探测器采集相应光谱图像^[2]。在提供照明光源的情况下,基于多个光学滤光片的光谱成像系统可以直接获得每个光谱通道的响应信息,但使用确定波长的多个滤光片波长不能连续可调^[3-5],使用液晶可调谐滤波器或声光可调谐滤波器可实现波长连续可调^[6,7],但价格昂贵。基于单色器的光谱成像系统输出的单色光直接照射整个物体,使得分布在物体表面的光强很小,因此对光源的光强要求很高。为了提高照射在物体表面的光强,本文采用主动照明方式,对WDF型瓦兹渥斯反射式单色仪进行了改装,在入射光一定的情况下增大出射光通量,从而提高照射在物体表面的光强,经过相应的数据处理得到波长连续可调的光谱数据立方体^[8],降低了系统成本,为实验室中小型目标的光谱成像研究提供了新的测量方法。

2 高光谱成像系统原理

本文所设计的基于数字滤波的主动式凝采高光谱成像系统的原理如图1所示。图中 S_1 、 S_2 分别为单色仪的入、出射狭缝; L_1 、 L_2 为成像透镜;光源S为汞灯和卤素灯;CCD摄像机连于PC机,由专门的软件控制采集图像。系统工作时,光源S发出的光束经过 L_1 成像于 S_1 处,在单色仪内被三棱镜色散成波长连续的光谱,再经过 S_2 和 L_2 成像于被测物上。这样,光源所发出的光经过单色仪和透镜成像于物体表面,物体对这部分光谱进行吸收和反射,CCD摄像机接收物体的反射光。CCD摄像机所拍摄到图像的灰度值反映了物体对入射光谱的反射响应特征。转动单色仪的鼓轮,展开光谱依次照射物体,得到物体在各个波

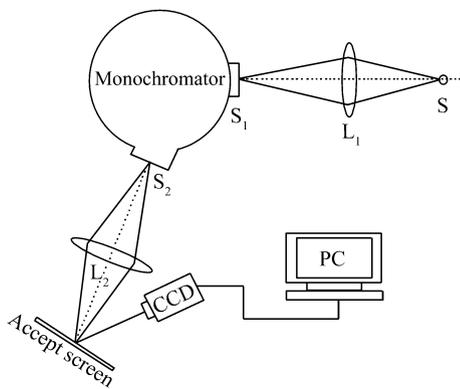


图1 高光谱成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of hyperspectral imaging system

长下的反射光谱响应图像。

入射狭缝 S_1 确定后,单色仪在输出单色光时,利用出射狭缝宽度控制射出的单色光的带宽,光谱成像系统的分辨率与狭缝宽度成反比。为了提高波长分辨率,必须减小出射狭缝宽度,继而减小通光量,使成像质量下降。为了解决这个问题,本系统将单色仪的出射狭缝卸去,增大通光量,再利用成像透镜将光谱成像到被测物表面,提高被测物表面的光强,从而提高成像质量。这样,CCD拍摄到的光谱图像为在垂直于狭缝方向上展开的连续光谱图像,根据这个特点本文设计了合适的定标方法和数字滤波器来模拟光学窄带滤波器,得到单个光谱通道下的光谱图像。

3 高光谱成像实验步骤

3.1 定标图像采集

按照图1建立高光谱成像系统,接收屏上放白纸,汞灯作为光源。调节各个部件的位置和参数使CCD拍摄到的基准谱线(546.1 nm绿色谱线)成像清晰。在上述条件下转动鼓轮(单色仪的鼓轮读数不同,出射光的中心波长不同),采集多幅图像。

3.2 被测物光谱响应图像采集

在上述光路中,将绿色树叶作为被测物放于接收屏处,卤素灯作为光源。改变鼓轮的位置使光谱扫描整个被测物,拍摄到一系列光谱响应图像。

3.3 数字滤波

系统拍摄到的图像是物体对连续光谱的响应情况,垂直于狭缝方向的不同位置有不同波长,为得到被测物的光谱数据立方,系统用数字滤波器模拟窄带滤波器,将目标波长对应的图像过滤出来。某中心波长的光谱响应图像的灰度值计算公式为:

$$P = \sum q_j P_j / \sum q_j, \quad (1)$$

其中 P 为光谱响应灰度均值, q_j 为第 j 幅图片此点的滤波系数, P_j 为第 j 幅图片此点的灰度值。在计算过程中可以对数字滤波器的带宽和中心波长进行设置,做到波长连续可调、带宽可调。

4 定标和光谱图像处理

4.1 波长定标原理

系统拍摄到的光谱响应图像上所对应的波长在垂直于狭缝方向展开。设图像垂直于狭缝方向的像素位置值为 x , 平行于狭缝方向为 y (下文同)。波长定标是要得到图像 x 处的波长值^[9], 即确定波长 λ 与位置 x 以及图像鼓轮读数的关系。WDF 型瓦兹渥斯反射式单色仪的 x 与 λ 不是线性关系, 直接拍摄大量的谱线进行 x - λ 拟合存在很大难度, 本系统通过单色仪鼓轮读数与 λ 的关系, 鼓轮读数与 x 的关系间接确定 λ 与 x 的关系。

首先, 利用传统方式对单色仪进行定标, 用最小二乘法对定标曲线进行拟合得到单色仪的鼓轮读数与出射狭缝中心波长的关系式:

$$\lambda = \lambda(g(x)), \quad (2)$$

其中, $g(x)$ 为 x 处的鼓轮读数, λ 为 $g(x)$ 所对应的波长。鼓轮读数与 x 之间存在线性关系, 可表示为:

$$g(x) = a(x - x_0) + g(x_0), \quad (3)$$

其中, $g(x_0)$ 和 x_0 为基准谱线对应的鼓轮读数和位置 x 值, a 为鼓轮读数的变化量与 x 的变化量之比, 称为定标系数。对不同鼓轮读数下的定标图像进行二值化和滤波可以得到清晰的谱线, 利用重心算法求取谱线中心, 重心算法求中心的表达式为:

$$\bar{X} = \sum_0^n m_i x_i / \sum_0^n m_i, \quad (4)$$

其中, m_i 为第 i 个点的像素灰度值, x_i 为这点的 x 值。利用多幅定标图像中谱线中心的鼓轮位置和对应的 x 值可以计算出 a , 则 x 处的波长可以表示为式(5)。

$$\lambda(x) = \lambda(a(x - x_0) + g(x_0)). \quad (5)$$

4.2 定标结果

利用上述方式对系统进行定标, 最小二乘法拟合出单色仪定标曲线, 曲线拟合结果如图2所示, 其中方框点为实际测量的点, 三角点为由拟合公式计算出的点, 连线为拟合曲线, 由图可以看出, 曲线拟合效果良好。

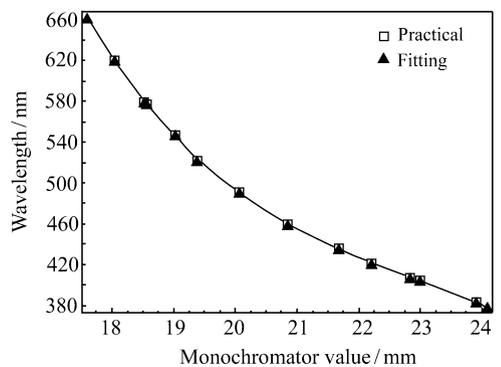


图2 单色仪曲线拟合结果

Fig. 2 Fitting result of monochromator

利用采集到的定标图像计算出定标系数 a , 代入式(5)可以计算出每个点的波长值。为检验上述定标方式的准确性, 实验拍摄了汞灯谱线的图像, 得到了波长与对应像素灰度值的关系, 如图3所示。

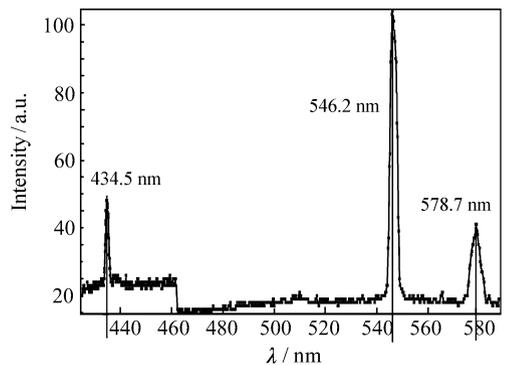


图3 定标结果

Fig. 3 Result of calibration

图中的3个峰值分别为汞灯的紫光(435.8 nm)、绿光(546.1 nm)、黄光(因光源光强较弱,入射狭缝较宽,579.1 nm和577.0 nm两个谱线重叠,故取中间波长578.05 nm)。从图3上读出峰值处的波长与实际之差分别为1.3、0.1和0.65 nm,都在2 nm以内,可以看出上述定标方式具有较高精确性。

4.3 被测物光谱响应结果

确定绿色植物的光谱响应情况在农作物病虫害防治和空间遥感中有重要作用^[2],实验以绿色树叶为研究对象,共拍摄了50幅绿色树叶的光谱响应图片,图4列出了绿色树叶在鼓轮读数为15.5 mm处的图像。



图4 光谱图像(15.500 mm)

Fig. 4 Spectral image (in 15.500 mm)

利用上述的定标数据对被测物的光谱响应图像进行数字滤波,滤波带宽是7 nm,计算出绿色树叶的光谱数据立方体。树叶上某点的光谱响应曲线如图5所示。图中550 nm处有较强的反射高峰,在670~710 nm之间有反射率急剧升高的

过程,很好地体现了绿色树叶对入射光谱的响应情况^[10]。710 nm之后曲线开始下降,与绿色树叶的实际光谱有差别,是由于实验所用的CCD的响应系数急剧下降所致。

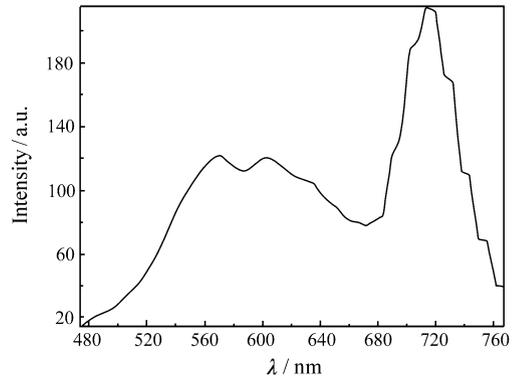


图5 绿色树叶上某点光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response of one point on green leaves

5 结 论

通过实测物体,得到了波长连续可调,带宽可调的光谱数据立方体和光谱响应曲线,验证了文中提出的光谱成像系统的可行性。对波长定标的检验结果表明,定标方式适用于本系统的波长标定,误差很小。该高光谱成像系统实现简单,成本低,通过扩大CCD的感光范围,并改用步进电机进行鼓轮旋转可以使系统的光谱分辨率达到2 nm,得到上百个连续光谱通道的响应情况。本系统可应用于实验室中可见光和近红外范围内的物质检测、样品纯度光谱曲线测定、比对以及显微光谱成像等应用。

参考文献:

- [1] DEMIR B, ÇELEBI A, ERTÜRK S. A low-complexity approach for the color display of hyperspectral remote-sensing images using one-bit-transform-based band selection[J]. IEEE T. Geosci. Remote, 2009, 47(1): 97-105.
- [2] 肖松山, 范世福, 李昀, 等. 光谱成像技术进展[J]. 现代仪器, 2003, 9(5): 5-8.
XIAO S SH, FAN SH F, LI Y, et al. Progress of spectral imaging technique[J]. Modern Instruments, 2003, 9(5): 5-8. (in Chinese)
- [3] MASAHIKO T, MIYAMOTO K, HIROAKI J, et al. Near infrared spectral imaging for the field server of lettuce growth [C]. SICE 2002, Proceeding of the 41st SICE Annual Conference, 5-7 Aug. 2002: 380-381.
- [4] ISHIZAWA H, RAKEUCHI M, NISHIMATSU T. Diffuse reflectance near-infrared spectral image measurement for the field monitoring of agricultural products [C]. 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (2002), 2002: 3-6.

- [5] 杨萍,廖宁放,何丽,等. 高速窄带多光谱成像系统光谱重建技术研究[J]. 影像技术,2007,(6):14-18.
YANG P, LIAO N F, HE L, *et al.*. Study on image acquisition and spectral construction based on speedy multi-spectral imaging system[J]. *Image Technol.*, 2007, (6):14-18. (in Chinese)
- [6] 赵慧洁,周鹏威,张颖,等. 声光可调谐滤波器的成像光谱技术[J]. 红外与激光工程,2009,38(2):189-193.
ZHAO H J, ZHOU P W, ZHANG Y, *et al.*. Acousto-optic tunable filter based spectral imaging technology[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2009, 38(2):189-193. (in Chinese)
- [7] 赵静,庞其昌,马骥,等. 基于液晶滤波器的连续光谱成像测试装置[J]. 光子学报,2008,37(4):758-762.
ZHAO J, PANG Q CH, MA J, *et al.*. Design of a continuous spectrum imaging apparatus based on LCTFs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(4):758-762. (in Chinese)
- [8] 徐晓轩,林海波,俞钢,等. 小型线形可变滤光片分光的可见成像光谱仪及其特性研究[J]. 光谱与光谱分析, 2002,22(9):713-717.
XU X X, LIN H B, YU G, *et al.*. Research of image spectrometer using linear variable interference filter[J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2002, 22(9):713-717. (in Chinese)
- [9] 陈少杰,唐玉国,巴音贺希格,等. 高速便携式近红外光栅光谱仪光电系统设计[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(4):323-328.
CHEN SH J, TANG Y G, Bayanheshig, *et al.*. Design of phoyometric sytsem of portable high-speed near-infrared grating spectrometer[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009, 2(4):323-328. (in Chinese)
- [10] 浦瑞良. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000:144-173.
FU R L. *Hyperspectral Remote and Application*[M]. Beijing:High Education Press,2000:144-173. (in Chinese)

作者简介:李 婧(1985—),女,山东德州人,硕士研究生,主要从事光谱成像系统设计方面的研究。

E-mail:lj8519@gmail.com

司书春(1970—),男,山东淄博人,副教授,主要从事测试计量技术和光谱成像系统设计的研究。

E-mail:ssc@sdu.edu.cn