

doi:10.3788/gzxb20154407.0711001

AOTF 高光谱成像系统的标定及性能测试

高志帆, 张红平, 吴琼水, 曾立波

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430079)

摘 要:提出了一套声光可调谐滤光器高光谱成像系统的标定及性能测试方法,并针对研制的高光谱成像系统原理样机进行了实验验证.结果表明:所提方法可以较为完整、准确地验证系统的光谱域及空间域特性;经过光谱图像平场校正可明显改善系统响应的非均匀性;通过自动控制相机曝光时间及像元增益的方式逐波段进行光谱灵敏度校正,可以提高系统的信噪比;采用改变相机曝光时间并测定系统响应的方式验证系统的光谱线性度,较传统方法更为方便,且可有效节约测试成本.该方法同样适用于基于液晶可调谐滤光器等高光谱成像系统.

关键词:多光谱成像;标定;性能测试;声光可调谐滤光器;光谱域;空间域

中图分类号:TH744.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)07-0711001-7

Calibration and Characterization of an AOTF-based Hyperspectral Imaging System

GAO Zhi-fan, ZHANG Hong-ping, WU Qiong-shui, ZENG Li-bo

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A systemic calibration and a characterization approach were presented for acousto optic tunable filter based hyperspectral imaging system. A series of tests were conducted to validate the performance of a self-integrated hyperspectral imaging system. Results show that the presented approach effectively validate the systematic characteristics in both spectral and spatial domains. Through flat-fielding correction, the system responsivity non-uniformity, known as pattern noise, is apparently eliminated. The spectral sensitivity of the system is corrected by controlling both the camera exposure time and digital gains at each wavelength, which significantly improve the signal to noise ratio of the system. By studying the system outputs with different camera exposure time, instead of using an attenuator to adjust the input light intensity, a more efficient and cost effective approach to measure the spectral linearity of the system is presented. The proposed methods are also applicable to the liquid crystal tunable filter based hyperspectral imaging systems.

Key words: Multispectral imaging; Calibration; Characterization; Acousto Optic Tunable Filter(AOTF); Spectral-domain; Spatial-domain

OCIS Codes: 110.0110; 110.4234; 120.0120; 120.6200

0 引言

从 20 世纪 70 年代起,高光谱成像技术被应用在遥感领域并逐渐发展^[1].近年来,该技术在食品工业、生物及医疗领域的应用也得到快速增长^[2-4].现有的高光谱成像系统型号多样,但大体上可分为传统的光机

扫描型和基于声光可调谐滤光器(Acousto-optic Tunable Filter, AOTF)或液晶可调谐滤光器(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF)等电调谐器件的凝视成像型两种类型^[5-7].

高光谱成像系统是多种光学、电子学及机械元件集成在一起的复杂系统,因此,对其关键参量及总体性

基金项目:国家科技支撑计划课题(No. 2011BAF02B02)和中国石油科技创新基金(No. 2012D-5006-0102)资助

第一作者:高志帆(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为光谱成像分析技术. Email:gao514692866@163.com

通讯作者:吴琼水(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为光谱与成像分析仪器开发. Email:qswu@whu.edu.cn

导 师:曾立波(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为光谱分析仪器研制. Email:lbzeng@whu.edu.cn

收稿日期:2014-12-15; **录用日期:**2015-03-10

<http://www.photon.ac.cn>

能进行系统、完整的标定与测试十分必要^[8]. 文献[9-12]对传统光机扫描型高光谱成像系统的标定及性能测试进行了研究, 这些方法基本上都适用于基于电调谐滤光器的高光谱成像系统. 但电调谐滤光器在采集过程中可以动态地调整相机的曝光时间、像元增益等参量^[13], 且具有较大的通光孔径及视场角^[14], 其成像属于凝视成像方式, 因此, 与传统光机扫描型光谱成像系统相比, 又有其独特的标定及性能测试方法^[15-16]. 现有文献中多是只对所构建系统的某一个方面, 或者某几个方面的性能进行定标或测试^[4, 13-16], 以满足系统某一特定应用的要求, 对专门介绍电调谐式光谱成像系统校正、标定及性能测试方法则涉及很少. 此外, 在现有的方法中, 对光谱灵敏度的校正仅通过控制面探测器的积分时间来实现^[4, 17], 由于受多种因素的制约, 校正后的光谱响应曲线并不是一条平直的直线; 系统光谱线性度的测试均需要依靠多级标准反射率板来进行^[8, 13], 测试复杂且成本较高; 且对光谱成像系统成像景深等的测试方法鲜有涉及, 即对系统性能的反映不够完整.

本文结合所搭建的系统, 提出了一种针对 AOTF 高光谱成像系统较为完整、实用的标定及性能测试方法, 涉及光谱域及空间域的多个方面. 对光谱成像系统进行平场校正可有效减小因系统响应的非均匀性对测量结果造成的影响; 采用自动控制相机曝光时间及数字增益相结合的方式对系统逐波段进行光谱灵敏度校正之后, 系统的信噪比得到显著提高. 采用控制相机曝光时间并测定系统响应的方法, 代替传统的多级标准反射率板法来验证系统的光谱线性度, 该方法不仅更为方便, 而且有效节约了测试成本.

1 AOTF 高光谱成像系统

1.1 工作原理

图 1 为 AOTF 高光谱成像系统工作原理的物理描述, 构成系统的核心部件是一块 AOTF 双折射晶体, AOTF 是一种基于布喇格衍射原理的全固态器件, 在外加声波的作用下, 可从一束宽带光源中分离出具有一定频率的单体光. 样品反射的光线经过偏振片 1 之后, 变成线偏振 o 光, 经孔径光阑入射到 AOTF 晶体内部. 晶体下端面粘贴压电换能器阵列, 上端面粘贴声波吸收体, 当经阻抗匹配网络向换能器阵列上外加射频 (Radio Frequency, RF) 信号时, 即产生声波并在晶体内部均匀传播, 该声波使晶体的折射率发生周期性变化, 通过其中的一部分光线将发生衍射, 同时被极化成为线偏振 e 光; 另一部分光线则直接透过晶体, 不发生衍射, 记为零级光. 偏振片 2 与偏振片 1 正交, 经过偏振片 2 之后, 零级光的能量大幅减弱, 而衍射的线偏振 e 光则不受影响. 衍射光由检测器阵列接收, 剩余零

级光被遮光板遮挡. 衍射光的波长与所加 RF 信号的频率之间存在一定的函数关系, 因此改变 RF 信号的频率就可以实现衍射光波长的扫描.

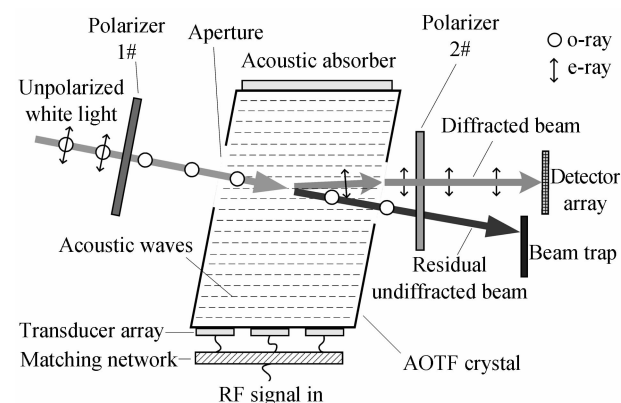


图 1 系统工作原理的物理描述

Fig. 1 Physical representation of the operating principle of the system

1.2 系统设计指标

所要构建的高光谱成像系统主要应用于手背皮下静脉的成像, 根据手背皮下静脉多光谱成像的理论分析, 并参照国内外同类装置的性能, 提出系统设计指标如表 1.

表 1 系统设计指标

Table 1 The system design criterion

Parameter	Design criterion
Spectral range	610~950 nm
Spectral resolution	Better than 5 nm(610~950 nm)
Spectral accuracy	<1 nm(610~950 nm)
SNR	>100 : 1(610~950 nm averaged)
Angle of view	5.7~16°(with Tamron 28~80 mm Lens)
Spatial resolution	Higher than 200 μm
Depth of field	>20 mm

1.3 高光谱成像系统构建

图 2 为在实验室构建的 AOTF 高光谱成像系统, 其整体框架采用铝型材搭建, 外表面用铝板覆盖, 铝板内壁采用黑色静电喷涂; 由 CCD 相机 (型号: DV437-BV, 美国 Andor 公司)、AOTF 模块 (型号: CVA-200-55-1.0-L, 美国 Brimrose 公司) 及镜头 (焦距: 28~80 mm, Tamron) 构成的 AOTF 成像光谱仪固定在支架上, 与支架一起可沿着导轨上下移动, 以调整与待测样品之间的距离; 使用 12 个功率为 50 W 的 MR16 卤钨灯组成阵列光源, 同时在阵列光源正下方添加一块中间开孔的聚碳酸酯 (Polycarbonate, PC) 光扩散板构成照明系统, 卤钨灯出射面固定耐高温的磨砂玻璃以漫射光束, 再经 PC 光扩散板进一步匀化照明; 在二维运动平台上放置一块漫反射标准白板作为系统样品台; 系统软件使用 VC 开发, 以控制 AOTF 模块及相机采集高光谱图像, 并对采集得到的数据进行处理、分析.

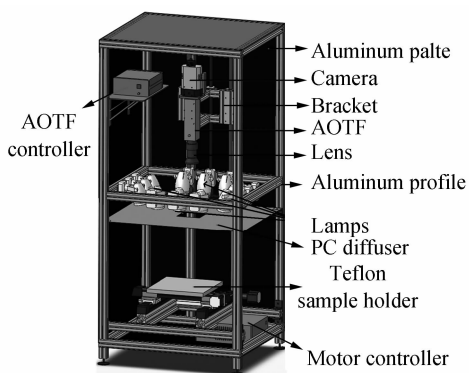


图2 基于AOTF的高光谱成像系统结构图

Fig. 2 The structure of the AOTF-based hyperspectral imaging system

2 系统光谱域标定及性能测试

2.1 光谱图像平场校正

为消除因照明不均匀、探测器内部暗电流、AOTF空间衍射效率分布、相机探测器不同像元响应及镜头不同位置透过率的差异等因素对测量结果造成的影响,需要通过光谱图像平场校正将采集得到的原始光谱图像转化为相对反射光谱图像^[14]. 具体的步骤为:首先关闭光源,采集暗场光谱图像 I_d ;然后打开光源,采集漫反射标准白板(型号:SRT-99-100,美国 Labsphere 公司)的光谱图像 I_w ,该标准白板在本系统

工作光谱范围内的光谱反射率值均在99%左右,可近似看做100%反射板;最后采集待测样品的原始反射光谱图像 I_s . 则相对反射光谱图像 I_r 为

$$I_r = \frac{I_s - I_d}{I_w - I_d} \times F \quad (1)$$

式中,系数 F 的取值只是为了将校正后图像的灰度值限定在一个规定的范围内,以方便实验. 一般希望输出8 bit的灰度图像,其灰度级范围为 $[0, 255]$,应取 $F=255$. 但由于噪音的存在,所得结果可能大于255,因此一般取一个比255稍小的数值.

在550~1 000 nm范围内,采用5 nm波长间隔分别采集暗场、漫反射标准白板和手背的光谱图像,然后根据式(1)进行平场校正,在校正前后的光谱图像立方体的相同位置各取一个 130×130 的矩形区域,校正效果如图3. 图3(a)为手背在880 nm处的原始图像;图3(b)为在880 nm处的漫反射标准白板图像;图3(c)为图3(a)经校正后得到的图像(取 $F=255$);图3(d)为图3(a)中矩形区域内图像的灰度直方图,灰度值离散地分布在160~205之间;图3(e)为图3(c)中矩形区域内图像的灰度直方图,灰度值较为集中地分布在240~250之间;图3(f)为分别从校正前、后光谱图像中的矩形区域内提取的两条平均光谱曲线,可以看出校正前的曲线变化特别大,而校正后的曲线则较为平直.

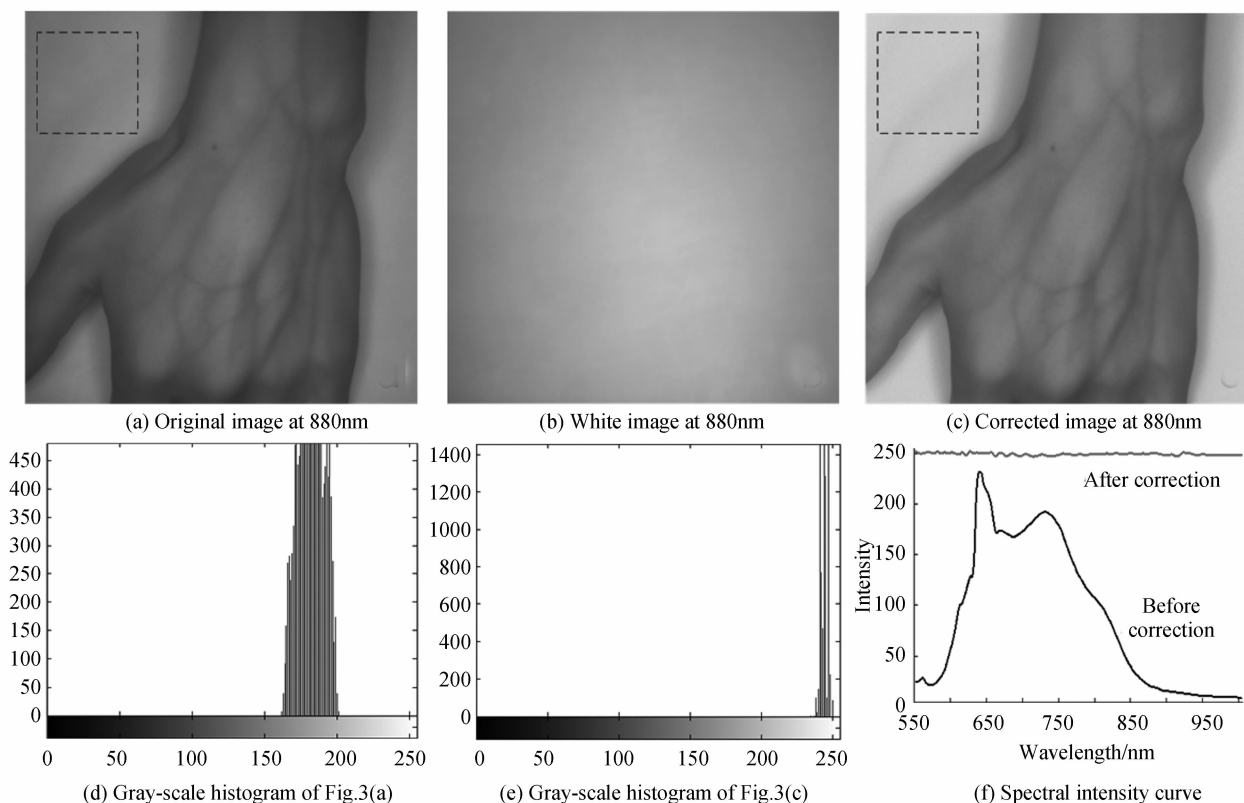


图3 光谱图像平场校正效果

Fig. 3 Test for flat-fielding correction

由于所选取的矩形区域是均匀漫反射标准白板的一部分,在理想状况下,其灰度值分布十分集中,所提取的平均光谱曲线应该是一条水平的直线.对比可以发现,经过光谱图像平场校正后可以得到较为接近理想状况的结果,系统响应的非均匀性得到了明显改善.

2.2 光谱准确度及光谱分辨率

通常,AOTF模块的光谱调谐曲线及光谱分辨率在出厂时已由厂家做过测试,所选用AOTF模块的光谱分辨率分布曲线如图4.

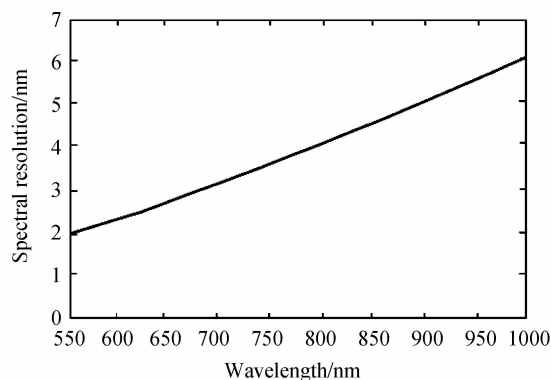


图4 AOTF模块光谱分辨率分布曲线

Fig. 4 Spectral resolution curve of the AOTF module

组装成高光谱成像系统之后,系统的光谱准确度主要取决于AOTF的波长调谐准确度,系统的光谱分辨率由AOTF在各个光谱通道下的通带宽度决定,通常由半高峰宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM)来描述.本系统中,使用波长为632.8 nm的He-Ne激光器进行测试.将激光照射在聚四氟乙烯白板上,设定曝光时间为0.1 s,扫描间隔为0.2 MHz,在88~177 MHz范围内进行5次连续扫描并取平均,然后在所得到的平均光谱图像中选取包含该激光斑的一

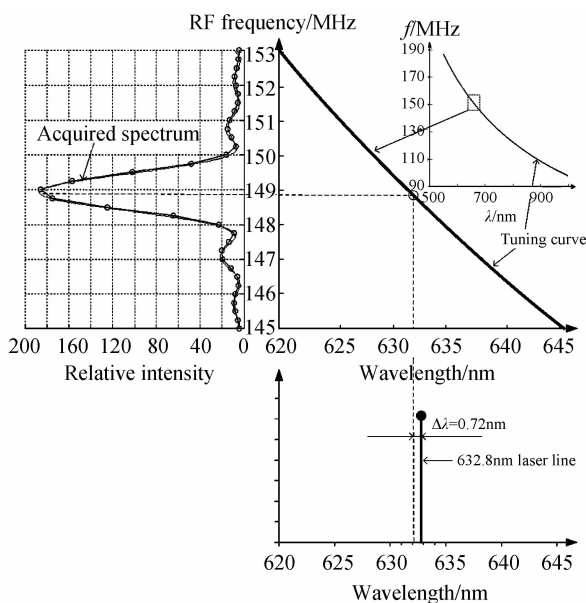


图5 光谱准确度及光谱分辨率测试

Fig. 5 Measurement for spectral accuracy and resolution test

个矩形区域,并提取其平均光谱,曲线拟合结果如图5.

从图5中可以看出,所提取的平均光谱曲线的主峰值出现在632 nm附近.经计算,曲线主峰值所对应的波长与632.8 nm的偏差为+0.72 nm,应用时需要校准;曲线主峰的FWHM为2.58 nm,说明本系统在632.8 nm处的光谱分辨率优于2.6 nm.

2.3 稳定性及信噪比测试

系统的稳定性指的是多次测量的重复性,在近红外光谱系统中是比光谱分辨率更为重要的指标.为了测试系统的稳定性,在550~1 000 nm范围内,采用5 nm波长间隔,连续采集一块200×200×10 mm聚四氟乙烯白板的光谱图像,该白板与漫反射标准白板SRT-99-100具有十分相似的反射特性,但反射率值比SRT-99-100略低(约低5%).每天测试之前首先预热光源60 min,然后在接下来的60 min内重复扫描5次,连续测试3天,一共得到15个三维光谱图像,测试过程中对每一个三维光谱图像都按照2.1节中的方法进行平场校正(取 $F=252$),最后提取这15个三维光谱图像同一矩形区域内的平均光谱曲线,其结果如图6.经计算,在550~1 000 nm范围内的反射光谱标准偏差为0.51%~1.02%,平均标准偏差为0.65%,系统稳定性较好.

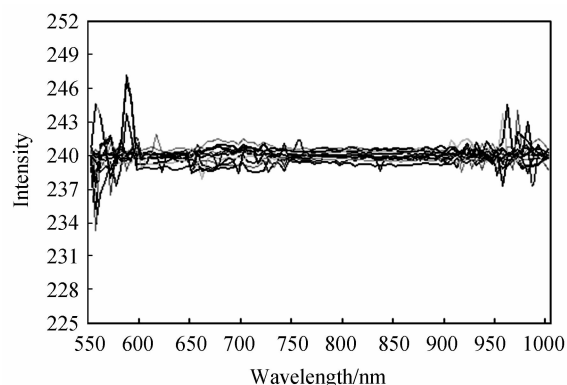


图6 稳定性及信噪比测试

Fig. 6 Measurement for stability and SNR test

由于聚四氟乙烯白板与漫反射标准白板SRT-99-100具有十分相似的反射特性,求比值的过程与常见的100%T线信噪比测试方法相似,因此,系统的信噪比仍使用图6中的数据来测算.高光谱成像系统的信噪比通常计算为^[18]

$$\text{SNR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{SNR}(\lambda_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\mu(\lambda_i)}{\sigma(\lambda_i)} \quad (2)$$

式中, N 为扫描的总的光谱波段数目, $\text{SNR}(\lambda_i)$ 为系统在波长 λ_i 处的信噪比, $\mu(\lambda_i)$ 、 $\sigma(\lambda_i)$ 分别为多次重复测量所得的光谱反射率曲线在波长 λ_i 处的平均值和标准差.计算可得,系统在各个波段下的信噪比值分布在98:1到196:1之间,在工作光谱范围两端的信噪比较低,系统整个工作光谱范围内的信噪比均值为132:1.

2.4 光谱灵敏度校正

设置相机的曝光时间为 0.35 s 并保持不变,在 550~1 000 nm 范围内采集 SRT-99-100 漫发射标准白板的光谱图像,然后提取视场中心一个 100×100 矩形区域内的平均光谱强度曲线,见图 7,可以看出在 600 nm 以下及 850 nm 以上波段光谱强度很弱,而 640 nm 处的光谱强度则已接近饱和,即系统的光谱灵敏度分布不均匀。虽然进行平场校正也可以得到相对正确的测量结果,但由 2.3 节可知,在光谱强度低的波段信噪比很差,因此,有必要对系统的光谱灵敏度进行校正。

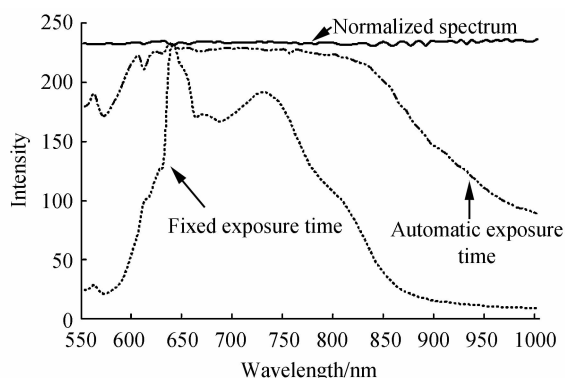


图 7 光谱灵敏度校正

Fig. 7 Correction for spectral sensitivity

采取自动控制相机曝光时间和数字增益相结合的方式对系统进行的光谱灵敏度校正。由于 CCD 是积分型器件,输出电流信号的大小不仅与光敏面的照度有关,还与积分时间成正比,因此,确定各个波段积分时间的步骤为:首先采集 SRT-99-100 漫发射标准白板的光谱图像,调整相机曝光时间,直到最高灵敏度波段的光谱强度达到 CCD 饱和值的 90% 左右,此时的相机曝光时间记为 t_0 。然后取所得光谱图像中心 100×100 大小的矩形区域,分别计算在各个波段下该区域内的平均灰度值 $m(\lambda_k)$,其中最高灵敏度波段的平均灰度值记为 M 。那么在第 k 个波段下的积分时间 $t(\lambda_k)$ 为

$$t(\lambda_k) = t_0 \times \min \left[R_{\max}, \frac{M}{m(\lambda_k)} \right] \quad (3)$$

式中 R_{\max} 是人为设定的最大积分时间倍数,由于计算出来的积分时间可能很大,会大大增加光谱图像的采集时间,因此有必要设定一个最大值。自动控制相机曝光时间之后得到的光谱灵敏度曲线如图 7,可以看出在 600 nm 以下及 850 nm 以上波段的光谱灵敏度增大了约 7 倍,但光谱灵敏度曲线仍不平直。对于光谱灵敏度曲线,以光谱强度的最大值为基准逐波段调整相机数字增益,即可得到较为平直的归一化光谱灵敏度曲线。对同一块漫反射标准白板重复测量 15 次,计算信噪比,得到在调整相机曝光时间及数字增益之后,系统

的信噪比均值约为 174 : 1,提高了 31.5%。表明进行光谱灵敏度校正可显著提高系统的信噪比,而仅仅依靠光谱图像平场校正是不够的。

2.5 光谱线性度

在光谱成像系统中,待测样品的光谱特征通过相机各像元输出电信号的强度来衡量,因此相机各像元输出电信号的强度必须与其入射光强成线性关系。这种线性关系一般使用一块具有多级反射率的标准反射板来验证(如美国 Labsphere 公司的 SRT-MS-100 多级反射率板,其具有 99%、50%、25% 和 12% 四级标准反射率),但材料价格通常十分昂贵。本文通过调整相机曝光时间的方式来改变入射到各像元的光强,然后检测相机各像元输出电信号的大小来测试系统的线性度。在 550~1 000 nm 范围内,采用 5 nm 波长间隔,设置相机曝光时间分别为 0.15 s、0.2 s、0.25 s、0.3 s、0.35 s 及 0.4 s,采集漫反射标准白板的光谱图像,并分别提取其平均光谱曲线,结果如图 8。

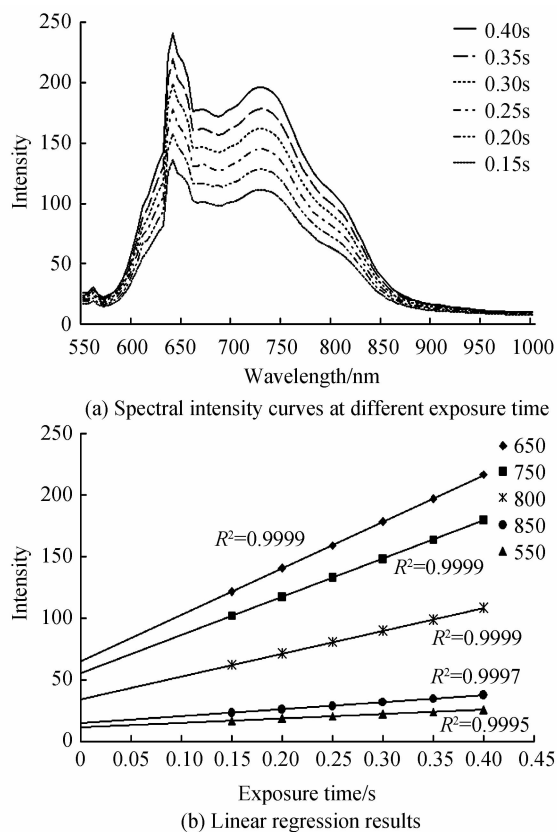


图 8 光谱线性度测试

Fig. 8 Measurement for spectral linearity test

图 8(a) 为从不同曝光时间下获取的光谱图像中提取出的平均光谱曲线,图 8(b) 分别为这些光谱曲线在 550 nm、650 nm、750 nm、800 nm 及 850 nm 处的值及相应的线性拟合直线,可以看出这几条拟合直线的回归系数 R^2 均大于 0.9995,说明本系统具有很好的线性度。

3 系统空间域标定及性能测试

3.1 空间分辨率

系统的空间分辨率由一块 USAF1951 光学分辨率板来测量,它有 0~7 组不同分辨率的标准图形,每一组由 6 个相互垂直的双向图案(3 个线对)构成.将光学分辨率板平放在漫反射标准白板上,设置镜头焦距为 80 mm,光圈大小为 $f/8$,调整光学分辨率板与镜头之间距离直到成像最清晰,此时二者距离为 610 mm.在 650 nm 波长处采集光学分辨率板的光谱图像,进行平场校正(取 $F=252$),实验结果如图 9.

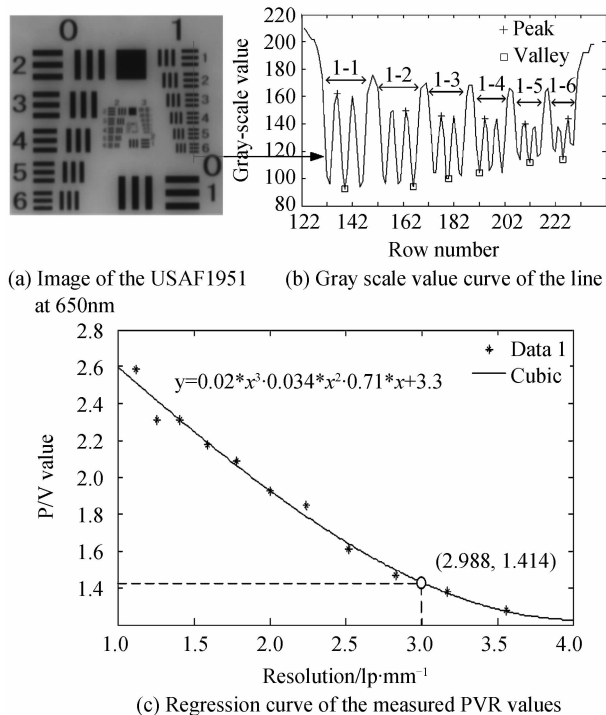


图 9 空间分辨率测量

Fig. 9 Measurement for spatial resolution test

图 9(a)为 650 nm 波长下得到的图像;9(b)为该图像中红色直线处(覆盖第 1 组的 6 个水平线对)的灰度值曲线.分别计算第 0 组和第 1 组中各水平线对灰度最大值与最小值的比值(Peak to Valley Ratio, PVR),然后以各线对 PVR 值为纵坐标,以查表得到的各线对对应的分辨率值为横坐标作图并拟合,得到 3 次多项式拟合曲线图 9(c).通常 PVR 值小于 $\sqrt{2}$ 则不能被分辨^[4, 12],由图 9(c)可知在当前测试条件下,本系统的空间分辨率为 2.988 lp/mm($167 \mu\text{m}$).

由于 AOTF 晶体的固有缺陷,其作为成像分光器件时会导致图像在一个方向上逐渐变得模糊,此外还存在谱段间漂移的问题,这些问题一般通过后续图像校正或者在光路中增加补偿器件的方式来处理.本系统中在 AOTF 晶体的出射面添加了一块精密设计的光楔,取得了较好的补偿效果,测算得到在 650 nm 处

的空间分辨率可作为衡量当前系统空间分辨能力的一个参考.使用同样的方法可以测算得到系统在整个光谱范围内的空间分辨率.

3.2 景深

系统景深(Depth of Field, DOF)指的是同一幅场景中能够清晰成像的最远与最近物体之间的距离,该项指标在高光谱成像系统的医学领域应用中非常重要.调整光学分辨率板与成像光谱仪镜头之间的距离,使其在 560~660 mm 之间以 5 mm 的步长变化,其它测试条件与 3.1 节中一致,分别采集光学分辨率板在 650 nm 波长处的图像并计算空间分辨率,系统的景深由所得空间分辨率曲线的半高峰宽度决定.

图 10 所示为获得的空间分辨率曲线,经计算可得在当前测试条件下,本系统的景深为 48 mm.

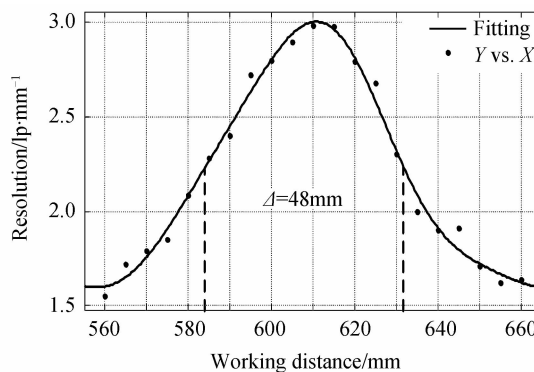


图 10 景深测量

Fig. 10 Measurement for DOF test

4 结论

本文针对实验室搭建的 AOTF 高光谱成像系统,提出了一套完整的系统标定及性能测试方法,分别进行实验测试了系统的光谱准确度及分辨率、稳定性及信噪比、光谱线性度、空间分辨率、成像景深等性能,并验证了该系统光谱图像平场校正、光谱灵敏度校正的效果.经过光谱图像平场校正可有效减小因照明不均匀、AOTF 空间衍射效率分布差异及镜头不同位置透过率的差异等因素对结果造成的影响;采用自动控制相机曝光时间及数字增益相结合的方式逐波段进行光谱灵敏度校正,系统的信噪比提高了 31.5%,说明仅进行光谱图像平场校正是不够的;利用控制相机曝光时间的方法,代替传统的多级标准反射率板法来测试系统的光谱线性度,有效降低了测试成本.本文中,光谱准确度及光谱分辨率均只在 632.8 nm 波长处测得,实际上,通过选用专门的定标光源(如氙灯、氪灯等),或者使用具有更高光谱分辨率的定标用光谱仪,可以进行二者全谱段的标定及测试.

参考文献

- [1] TONG Qing-xi, XUE Yong-qi, ZHANG Li-fu. Progress in hyperspectral remote sensing science and technology in China

- over the past three decades[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(1): 70-91.
- [2] LORENTE D, ALEIXOS N, SANCHIS J G, *et al.* Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, **5**(4): 1121-1142.
- [3] PARK B, LEE S, YOON S C, *et al.* AOTF hyperspectral microscope imaging for foodborne pathogenic bacteria detection [C]. SPIE, 2011, **8027**: 802707.
- [4] GEBHART S C, THOMPSON R C, ANITA M J. Liquid-crystal tunable filter spectral imaging for brain tumor demarcation[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(10): 1896-1910.
- [5] 王建宇,舒嵘,刘银年. 成像光谱技术导论[M]. 北京:科学出版社, 2011:79-83.
- [6] YU Lei, WANG Shu-rong, QU Yi, *et al.* Broadband FUV imaging spectrometer: advanced design with a single toroidal uniform-line-space grating [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(22): 4468-4477.
- [7] GAT N. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review [C]. SPIE, 2000, **4056**: 50-64.
- [8] NOURI D, LUCAS Y, TREUILLET S. Calibration and test of a hyperspectral imaging prototype for intra-operative surgical assistance[C]. SPIE, 2013, **8676**.
- [9] POLDER G, VAN DER HEIJDEN G W A M, VAN DER VOET H, *et al.* Measuring surface distribution of carotenes and chlorophyll in ripening tomatoes using imaging spectrometry[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, **34**(2): 117-129.
- [10] LAWRENCE K C, PARK B, WINDHAM W R, *et al.* Calibration of a pushbroom hyperspectral imaging system for agricultural inspection[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, **46**(2): 513-521.
- [11] MIN M, LEE W S, BURKS T F, *et al.* Design of a hyperspectral nitrogen sensing system for orange leaves[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, **63**(2): 215-226.
- [12] WANG Yi-qun, YAN Chang-xiang, JIA Ping. Motion precision measurement of imaging spectrometer's scanning mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 185-189. 汪逸群,颜昌翔,贾平. 成像光谱仪扫描镜运动准确度测量[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 185-189.
- [13] WANG Wei-lin, LI Chang-ying, TOLLNER E W, *et al.* A liquid crystal tunable filter based shortwave infrared spectral imaging system: calibration and characterization [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, **80**: 135-144.
- [14] BEI Ling, DENNIS G I, MILLER H M, *et al.* Acousto-optic tunable filters: fundamentals and applications as applied to chemical analysis techniques [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, **28**(2): 67-87.
- [15] JAKA K, MIRAN B, FRANJO P, *et al.* Spectral characterization and calibration of AOTF spectrometers and hyper-spectral imaging systems [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2010, **101**(1): 23-29.
- [16] MIRAN B, FRANJO P, LIKAR B. Spectral characterization of near-infrared acousto-optic tunable filter (AOTF) hyperspectral imaging systems using standard calibration materials[J]. *Applied Spectroscopy*, 2011, **65**(4): 393-401.
- [17] POLDER G, VAN DER HEIJDEN G W A M. Calibration and characterization of spectral imaging system[C]. SPIE, 2001, **4548**: 10-17.
- [18] GEBHART S C, STOKES D L, TUAN V D, *et al.* Instrumentation considerations in spectral imaging for tissue demarcation: comparing three methods of spectral resolution [C]. SPIE, 2005, **5694**: 41-52.