

基于角度调谐窄带滤光片的光谱图像采集系统

蒋胜广 蔡渊 李天松 孙逢圆 郭万鹏 刘仁森 钟沃楼

Spectral image acquisition system based on angle-tuned narrow-band filter

JIANG Shengguang, CAI Yuan, LI Tiansong, SUN Fengyuan, GUO Wanpeng, LIU Rensen, ZHONG Wolou

引用本文:

蒋胜广, 蔡渊, 李天松, 等. 基于角度调谐窄带滤光片的光谱图像采集系统[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 596–603. DOI: 10.5768/JAO202546.0301007

JIANG Shengguang, CAI Yuan, LI Tiansong, et al. Spectral image acquisition system based on angle-tuned narrow-band filter[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 596–603. DOI: 10.5768/JAO202546.0301007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于超表面的多通道窄带滤光片研究

Research on multi-channel narrow-band filter based on metasurface

应用光学. 2024, 45(1): 184–191 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0105002>

基于双层金属光栅的中波红外多通道滤光片结构

Multi-channel mid-infrared filter structure based on bilayer metallic grating

应用光学. 2020, 41(1): 176–179 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0106001>

光场多光谱相机像方远心镜头光学设计

Optical design of image telecentric lens for optical field multispectral camera

应用光学. 2020, 41(3): 603–610, 617 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0305003>

基于高光谱成像技术的微小摄像头检测技术

Tiny camera detection technology based on hyper-spectral imaging technology

应用光学. 2021, 42(6): 1107–1114 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605001>

用于观察瞄准镜的截止滤光片设计和制备

Design and preparation of cut-off filter for observation scope

应用光学. 2022, 43(2): 221–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201006>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0596-08

引用格式: 蒋胜广, 蔡渊, 李天松, 等. 基于角度调谐窄带滤光片的光谱图像采集系统 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 596-603.

JIANG Shengguang, CAI Yuan, LI Tiansong, et al. Spectral image acquisition system based on angle-tuned narrow-band filter[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 596-603.



在线阅读

基于角度调谐窄带滤光片的光谱图像采集系统

蒋胜广, 蔡 渊, 李天松, 孙逢圆, 郭万鹏, 刘仁森, 钟沃楼

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 分光元件是光谱成像系统的重要光学元件, 滤光片分光是一种常见且有效的分光手段。提出了基于角度调谐窄带滤光片分光的光谱成像系统, 通过调整滤光片与入射光之间的夹角, 使得透射光谱的中心波长发生偏移, 从而实现特定波长范围内的光谱成像。该系统主要由可调滤光片的光学镜头、角度调谐装置、CMOS 相机和上位机构成, 系统的视场角为 17.5° 、 $F/\#$ 为 8、焦距为 26 mm、总长为 200 mm, 各波段 MTF 曲线在 96 lp/mm 处均大于 0.3, 畸变控制在 2% 以内, 光谱分辨率约为 3 nm。经过实验测试验证, 本系统可以在 $0^\circ \sim 46^\circ$ 入射角范围内进行角度调谐, 实现连续分光功能, 能够捕捉在一定光谱范围内任意中心波长对应的光谱图像。

关键词: 窄带滤光片; 角度调谐; 光学系统; 光谱成像

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301007

Spectral image acquisition system based on angle-tuned narrow-band filter

JIANG Shengguang, CAI Yuan, LI Tiansong, SUN Fengyuan, GUO Wanpeng,
LIU Rensen, ZHONG Wolou

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Optical splitter is an important optical element in spectral imaging system. Among them, filter light splitting is a common and effective means of light splitting. A spectral imaging system based on angle-tuned narrowband filter splitting was proposed. By adjusting the angle between the filter and the incident light, the central wavelength of the transmission spectrum was shifted, so as to realize spectral imaging in a specific wavelength range. The system mainly consisted of an optical lens with an adjustable filter, an angle tuning device, a CMOS camera and an upper stage mechanism. The field of view angle of the system is 17.5° , $F/\#$ is 8, focal length is 26 mm, and total length is 200 mm. The MTF curve of each band is greater than 0.3 at 96 lp/mm, the distortion is controlled within 2%, and the spectral resolution is about 3 nm. After experimental testing and verification, the system can perform angle tuning in the incidence angle range of $0^\circ \sim 46^\circ$, which realizes the continuous light splitting function, and can capture the spectral image corresponding to any central wavelength in a certain spectral range.

Key words: narrow-band filter; angle tuning; optical system; spectral imaging

引言

光谱成像技术起源于 20 世纪 80 年代, 是将成

像技术与光谱技术相结合, 在获取目标二维空间信息的基础上增加了光谱维度, 从而能够采集具

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-08-04

基金项目: 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD20159078); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金 (GXKL06190101)

作者简介: 蒋胜广 (1995—), 男, 硕士, 主要从事嵌入式高光谱成像研究。E-mail: 1787887319@qq.com

通信作者: 蔡渊 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学薄膜器件、光谱成像技术和计算机视觉研究。

E-mail: ssccyyss@guet.edu.cn

有高光谱分辨率的连续窄波段图像数据, 实现了图谱合一的功能^[1-3]。经过几十年的持续研究与发展, 光谱成像技术取得了诸多突破与创新^[4]。这些技术的多样化进步不仅拓展了光谱成像技术的应用领域, 还为科研、工业、医学等多个领域提供了坚实的技术支持^[5-7]。

按照分光方式, 光谱成像技术可以分为色散型、干涉型和滤光片型等多种类型^[8]。滤光片分光方式具有高选择性、结构简单、操作便捷以及成本经济等特点。相较于色散型和干涉型分光技术, 滤光片分光无需复杂的光路设计, 同时还能保持较高的光谱分辨率^[9]。滤光片型分光常见的有液晶可调谐滤光片(liquid crystal tunable filter, LCTF)、声光可调谐滤光片(acousto-optic tunable filter, AO-TF)和滤光片轮切换等方式^[10]。文献[14]提出一种使用可调谐薄膜滤光片的光谱成像技术, 将滤光片作为分光元件应用在荧光显微镜中。本文阐述了一种光谱成像系统的通用设计与实现方法, 将窄带滤光片集成到光学成像系统中, 统筹了整体的光学性能, 减少了角度调谐窄带滤光片对成像质量造成的不良影响。

本文设计的系统主要由可调滤光片的光学镜头、角度调谐装置、CMOS 相机以及上位机组成, 整体结构紧凑; 在成像质量方面, 系统各波段的MTF 曲线在 96 lp/mm 处均大于 0.3, 同时最大畸变被控制在 1.79 %, 光谱分辨率约为 3 nm。

1 分光原理

1.1 光线斜入射窄带滤光片时中心波长偏移原因

薄膜干涉是指当光线通过薄膜时, 由于光的干涉效应而产生的光学现象^[11]。窄带滤光片是基于多层膜堆叠技术, 通过利用薄膜干涉现象, 实现对光谱的有效分离。

薄膜干涉原理图如图 1 所示。当多波长光线以倾斜角度入射至窄带滤光片时, 相应的 r_1 和 r_2 的光程差 Δ 为

$$\Delta = 2n_{\text{eff}}d\cos\theta_t \quad (1)$$

式中: d 为间隔层厚度; θ_t 为间隔层介质的等效折射角; n_{eff} 为间隔层介质的等效折射率。干涉现象会产生相位差 δ , 计算公式为

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{4\pi n_{\text{eff}}d\cos\theta_t}{\lambda} \quad (2)$$

当相位差 δ 满足 $2k\pi$ (k 为整数) 条件时, 窄带滤

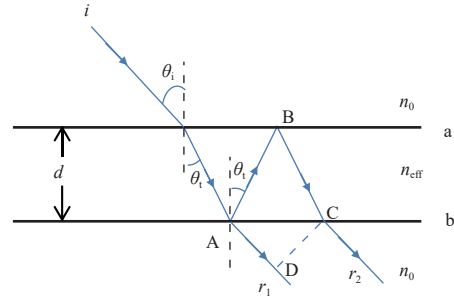


图 1 薄膜干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thin film interference

光片能够精准地实现单一波长的光波滤出。这一特性使得滤光片在光学应用中发挥着关键作用, 能够准确筛选出所需的特定波长光波, 同时有效抑制其他波长的干扰^[12]。由式(2)可得:

$$k\lambda = 2n_{\text{eff}}d\cos\theta_t \quad (3)$$

由折射定律可得:

$$n_0 \sin\theta_i = n_{\text{eff}} \sin\theta_t \quad (4)$$

式中: n_0 为空气折射率; θ_i 为入射角。由式(4)可以推出:

$$k\lambda = 2n_{\text{eff}}d\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\theta_i}{n_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (5)$$

当入射光正入射时, 即入射角度 $\theta_i = 0^\circ$, 设其透过窄带滤光片的中心波长为 λ_0 , 由式(5)可得:

$$k\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}d \quad (6)$$

将式(5)与式(6)相比, 可得:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\sin\theta_i}{n_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (7)$$

根据式(7), 可以得出以下结论: 随着入射角的逐渐增大, 滤光片透射光谱的中心波长数值会表现出减小的趋势, 即透射光谱的中心波长会向短波方向偏移^[13]。根据这一特性, 可以通过不断调整滤光片与光轴之间的夹角实现分光功能, 如图 2 所示。

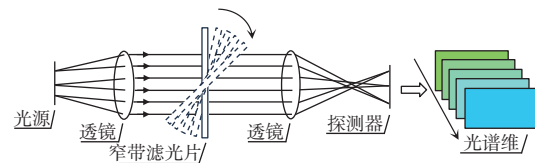


图 2 光谱成像系统分光示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral imaging system

1.2 窄带滤光片的入射角度与透射光的中心波长关系

当入射光斜入射进滤光片时, 其透射光谱的中

心波长会向短波方向偏移。根据这一特性,深入研究入射光与滤光片之间的夹角和透射光波长之间的关系,通过精确控制入射光与滤光片的夹角,可以有效地筛选出所需的波长,从而实现光谱成像的目标^[14]。

本文采用的窄带滤光片详细参数如表1所示。该滤光片的半带宽非常狭窄,仅为3 nm,能够高度精确地筛选特定波长的光线,其他波长的光线则被有效抑制。此外,滤光片的截止深度大,进一步提升了其在光学系统中的应用效能。通过采用这款窄带滤光片,能够实现更为精准和高效的光学控制,从而提升整体系统的性能。

表1 窄带滤光片参数

Table 1 Parameters of narrow band filter

滤光片参数	指标
尺寸/mm	25
中心波长/nm	500
半带宽/nm	3
峰值透射率/%	80
截止深度(@200 nm~1 200 nm)	≥OD4

使用 PerkinElmer 公司的 LAMBDA 365 紫外/可见分光光度计,对窄带滤光片在不同入射光角度下的透射光谱进行精确测量。整理收集到的数据并系统地进行处理,绘制出不同入射角度下的透射光谱曲线图,如图3所示。从图3可以看出,随着入射角度逐渐增大,透射光谱曲线的中心波长以及通带均呈现出向短波方向移动的趋势。由于不同偏振成份的光谱特性存在差异,当光线以较大角度入射时,s偏振光和p偏振光的特性产生分离,改变了原有的光谱轮廓和通带宽度^[15]。

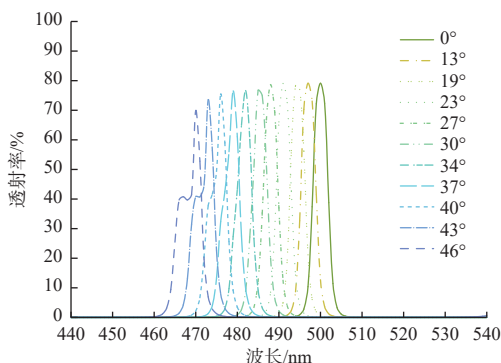


图3 不同入射角度下的透射光谱曲线图

Fig. 3 Transmission spectrum curves at different incidence angles

基于上述实验结果,对窄带滤光片的中心波长与入射角度之间的关系进行分析,绘制出如图4所示的对应关系图。从图4可以看出,窄带滤光片的中心波长随着入射角度的变化呈现出特定的变化趋势。

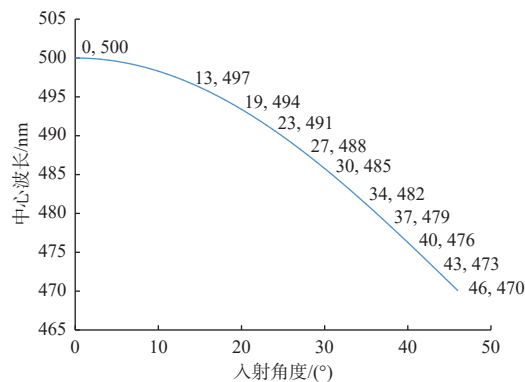


图4 窄带滤光片中心波长与入射角度的关系

Fig. 4 Relation between central wavelength and angle of incidence of narrow band filter

2 光学成像系统

2.1 光学系统参数设计

本文选用尺寸为 1/2 inch 的 CMOS 图像传感器,不仅可保证足够的成像面积,而且还确保了图像的高分辨率和清晰度。根据特定的使用要求,本文设计镜头的目的是,在距离目标物体 300 mm 位置上,能够清晰地捕捉到一幅 80 mm×60 mm 的画面。关键参数计算如下^[16]:

镜头放大率 M 为

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{8}{100} = 0.08 \quad (8)$$

镜头焦距 f 为

$$f = \frac{u}{\frac{1}{M} - 1} = \frac{300}{\frac{1}{0.08} - 1} \approx 26 \text{ mm} \quad (9)$$

镜头视场角 2ω 为

$$2\omega = 2 \arctan\left[\left(\frac{h'}{2}\right)/f\right] = 2 \arctan\left[\left(\frac{8}{2}\right)/26\right] \approx 17.5^\circ \quad (10)$$

式中: h' 为 CMOS 图像传感器的对角线尺寸; h 为镜头画面对角线尺寸; u 为物距。

此外,窄带滤光片偏转至最大角度后,为了确保入射光能够完全覆盖整个滤光片,光圈的大小必须适当地限制。为此,本文设定 $F\#$ 为 8,有助于精确控制光圈的大小,从而确保入射光的有效覆盖。通过这样的调整,能够在保证滤光片性能的

同时,优化光学系统的整体性能。系统主要参数如表2所示。

表 2 光学系统参数

Table 2 Optical system parameters

系统参数	指标
图像传感器尺寸/inch	1/2
像元尺寸/ μm	5.2
分辨率/pixels	1 280×1 024
焦距/mm	26
视场角/ $^{\circ}$	17.5
畸变/%	<3
MTF(@96 lp/mm)	≥ 0.3
$F\#$	8
波长/mm	380~760

2.2 光学系统优化

光学系统采用天塞物镜作为初始结构,主要是基于其良好的光学性能和较低的畸变特性^[17]。此外,天塞物镜中使用了双胶合透镜,可以有效地消除色差,改善边缘视场的成像质量^[18]。

导入初始结构相关数据到 Zemax 中,设置系统波长、物高和像方空间 $F\#$ 。在优化过程中,对透镜的边界条件进行限制,优化结果如图5所示。为了满足滤光片的旋转和通光需求,将窄带滤光片放置在第3和第4个透镜之间。由于这两组透镜间的光线呈平行状态,使得所有视场入射光线与窄带滤光片的入射角度近乎一致。这种设计可确保不同视场的光线在经过滤光片分光后,出射光谱波长能够保持一致。各镜片的基本参数如表3所示。

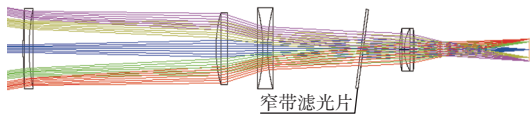


图 5 优化后的成像系统
Fig. 5 Optimized imaging system

表 3 透镜的基本参数

Table 3 Basic parameters of lens

编号	表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃
1	标准面	142.505	2.500	H-ZF11
2	标准面	47.022	78.357	
3	标准面	32.530	4.700	H-ZBAF52
4	标准面	Infinity	14.782	
5	标准面	-39.020	2.000	H-BAK7

表 3 (续)

编号	表面类型	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃
6	标准面	39.170	5.423	
7	标准面	Infinity	1.000	K9
8	标准面	Infinity	37.264	
9	标准面	23.050	2.000	ZF1
10	标准面	10.428	4.200	H-K9L
11	标准面	-45.300	10.085	
12	光阑	Infinity	38.510	

2.3 像质评价与结果分析

常用的像质评价指标包括调制传递函数(modulation transfer function, MTF)、点列图 (spot diagram, SPT)、衍射圈入能量(diffraction encircled energy, ENC)、场曲和畸变等^[19]。MTF 在光学系统设计和分析中起着重要作用^[20],它描述了在不同空间频率时,从物空间到像空间的调制传递函数的模数。奈奎斯特采样定理指出:为了从采样信号中无失真地恢复原信号,采样频率应至少为信号最高频率的 2 倍^[21]。在光学成像系统中,图像传感器的像素密度(即采样频率)必须足够高,以捕捉光学系统所成图像的细节。截止频率由式(11)计算得到:

$$N = \frac{1}{2P} \times 1\,000 = \frac{1\,000}{2 \times 5.2} \approx 96\text{ lp/mm} \quad (11)$$

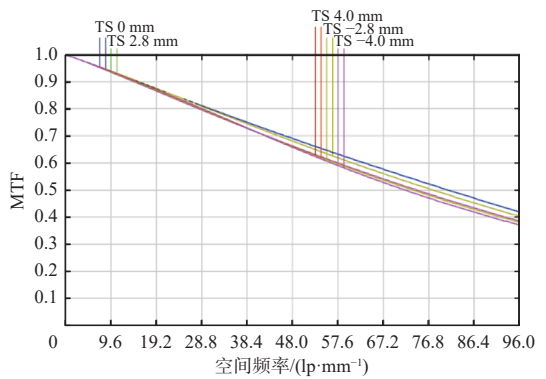
式中: N 为截止频率; P 为图像传感器的单个像元尺寸。由式(11)可知,为了使成像效果达到理想水平,MTF 值在截止频率 96 lp/mm 处必须高于 0.3。当 MTF 值超过 0.3 时,系统能够有效捕捉并传递图像的细微特征,确保高质量的成像效果^[22]。设计的光学系统评价结果如图6所示。从图6(a)可以看出,在截止频率为 96 lp/mm 时,MTF 值超过了 0.3,表明该光学系统在指定频率下的成像质量是理想的,符合成像质量的标准要求^[23]。

在光学系统性能评价中衍射圈入能量(ENC)是一个关键性指标,它通过计算点扩散函数在特定空间范围内的能量集中度来定量表征成像系统的能量分布特性。ENC 的横坐标表示从零开始变化的包围圆的半径,纵坐标表示单个视场落在包围圆中的能量与该视场经过光学系统后总能量的比值,如图6(b)所示。从图6(b)可以看出,在包围圆能量半径为 5 μm 时,能够覆盖各个视场成像光斑能量约 80%,具有较好的成像质量^[24]。

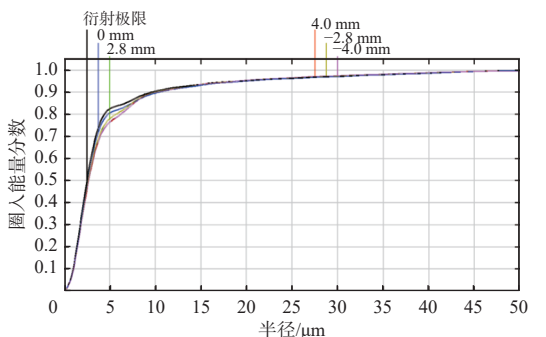
点列图(SPT)是一种重要的几何分析工具,用于评估光学系统中能量的集中分布和弥散情况。通过 SPT 可以直观地了解成像系统中各个点的光

线分布情况,以及光线在成像面上的弥散程度^[25]。从图6(c)可以看出,该成像系统的弥散斑的均方根(root mean square, RMS)半径最大值为3.840 μm ,说明在成像面上光线的弥散程度相对较小,能量相对集中。

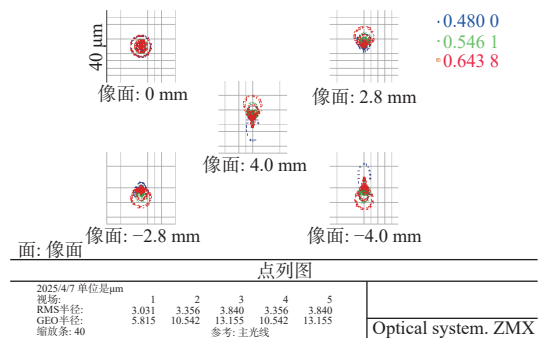
从图6(d)可以看出,场曲小于0.2 mm,说明成像系统在不同位置的像面畸变较小,图像的均匀性较好。此外,畸变也控制在2%以内,满足成像系统性能指标要求。



(a) 光学传递函数



(b) 衍射圈能量曲线



(c) 点列图

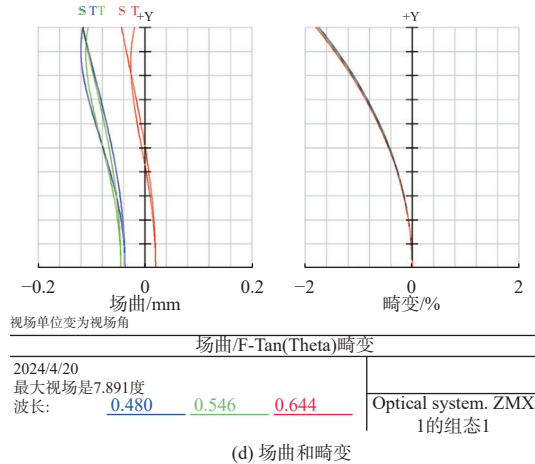


图6 光学系统像质评价

3 系统构建及实验结果分析

光谱图像采集系统构成示意图如图7所示。镜头负责捕获样品的空间信息,将光线聚焦并传输至系统内部。角度调谐装置驱动窄带滤光片进行旋转,实现分光功能。最后,图像传感器将接收到的光谱信息转换为数字信号,并通过上位机系统进行显示和处理。

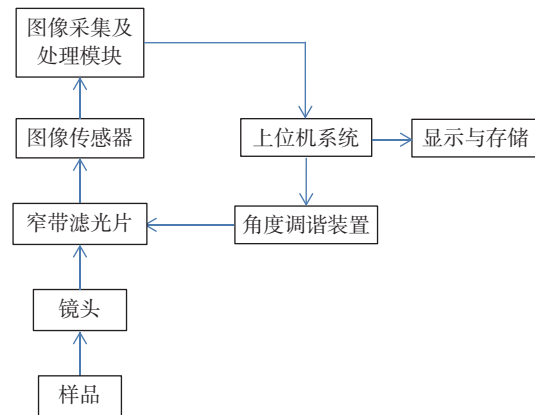


图7 光谱图像采集系统构成示意图

光谱图像采集设备和光谱采集上位机系统的具体形态分别如图8(a)和图8(b)所示。在实际操作中,根据图4所示窄带滤光片的中心波长和入射角度间的关系模型,在上位机系统中预先设定好窄带滤光片需要偏转的角度值。在上位机系统点击扫描按钮后,系统即可自动拍摄一组不同角度下的图像,从而实现光谱图像的快速、连续采集。

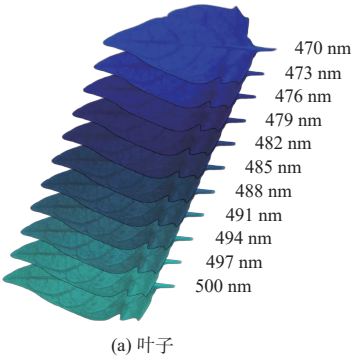


图 8 光谱图像采集系统

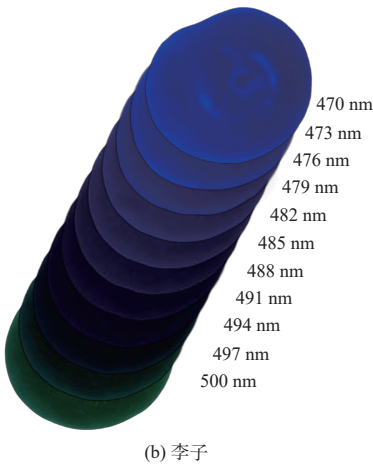
Fig. 8 Spectral image acquisition system

实验中采用 LED 灯作为光源, 光谱分布相对稳定, 可减少光谱图像中的噪声。实验过程中分别获取了入射角度为 $0^{\circ}\sim 46^{\circ}$ 样品的光谱图像, 如图 9 所示。

图 9 中不同角度分别对应着 $500\text{ nm}\sim 470\text{ nm}$ 的波段。通过对比不同入射角度下的光谱图像, 可以观察到光谱图像存在明显的色彩强度变化, 这一结果表明, 该系统能够有效地采集不同入射角下对应不同波段的光谱图像。



(a) 叶子



(b) 李子

图 9 不同入射角度下的光谱图像

Fig. 9 Spectral images at different incidence angles

4 结论

本文结合光谱成像技术和图像采集技术, 研制了一种光谱图像采集系统。该系统主要由可调滤光片的光学镜头、角度调谐装置、CMOS 相机以及上位机组成, 工作距离为 300 mm , 焦距为 26 mm , 视场角为 17.5° , 光谱分辨率约为 3 nm , 能够通过改变入射光与窄带滤光片之间的夹角实现光谱图像采集功能。相较于传统的轮转滤光片型系统, 本系统能够在更短的时间内完成波长的切换, 并且可获取连续的光谱图像, 为光谱分析提供了更为稳定和连贯的数据支持。

在后续的研究中, 为了扩展光谱范围, 可以考虑加入具有不同中心波长的窄带滤光片, 以获取更丰富的光谱信息, 从而更加全面地了解和分析目标物体的光谱特性, 进一步提升光谱图像采集系统的性能。

参考文献:

[1] 常凌颖, 张强, 邱跃洪. 宽波段一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 122-131.
CHANG Lingying, ZHANG Qiang, QIU Yuehong. Optical system design of wide-band integrated AOTF imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 122-131.

[2] 贾文波, 秦天翔, 黄蕴涵, 等. 红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 147-157.
JIA Wenbo, QIN Tianxiang, HUANG Yunhan, et al. Design and analysis of optical system of infrared dual-

- band imaging spectrometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 147-157.
- [3] SHAO Y, LAN J, NIU B. Dual-channel networks with optimal-band selection strategy for arbitrary cropped hyperspectral images classification[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 19: 1-5.
- [4] KHAN M J, KHAN H S, YOUSAF A, et al. Modern trends in hyperspectral image analysis: a review[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 14118-14129.
- [5] 王阳. 地基对月成像光谱测量及月球辐射模型研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- WANG Yang. Ground-based lunar imaging spectrum measurement and lunar radiation model research[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018
- [6] 桂江生, 吴子娟, 顾敏, 等. 高光谱成像技术在农业中的应用概述[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(7): 1101-1105.
- GUI Jiangsheng, WU Zixian, GU Min, et al. Overview of the application of hyperspectral imaging technology in agriculture[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(7): 1101-1105.
- [7] 汪俊锋. 基于高光谱成像的地物三维模型重构关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- WANG Junfeng. Research on key technologies of 3D model reconstruction of ground objects based on hyperspectral imaging[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [8] 于磊. 成像光谱仪的发展与应用(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 298-308.
- YU Lei. Development and application of imaging spectrometers (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 298-308.
- [9] 王莎莎. 基于滤光片型光谱成像的目标检测方法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- WANG Shasha. Research on target detection methods based on filter-based spectral imaging[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [10] 高泽东, 郝群, 刘宇, 等. 高光谱成像与应用技术发展[J]. 测绘技术, 2019, 39(4): 24-34.
- GAO Zedong, HAO Qun, LIU Yu, et al. Hyperspectral imaging and application technology development[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(4): 24-34.
- [11] KATS M A. Thin-film interference in lossy, ultra-thin layers[J]. Optics & Photonics News, 2014, 25(1): 40-47.
- [12] 俞侃, 吉紫娟, 黄德修, 等. 基于薄膜滤光片的角度调谐系统设计[J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1495-1498.
- YU Kan, JI Zijuan, HUANG Dexiu, et al. Design of angle tuning system based on thin film filter[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(10): 1495-1498.
- [13] 谢钟涛, 余桂英. 高性能可调节滤波片的优化设计方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 213-220.
- XIE Zhongtao, YU Guiying. Optimization design method of high performance adjustable filter[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 213-220.
- [14] FAVREAU P, HERNANDEZ C, LINDSEY A S, et al. Thin-film tunable filters for hyperspectral fluorescence microscopy[J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(1): 11017.
- [15] 俞侃, 包佳祺, 黄德修, 等. 斜入射滤光片的偏振相关损耗抑制技术[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 101-105.
- YU Kan, BAO Jiaqi, HUANG Dexiu, et al. Polarization correlation loss suppression technique for oblique incidence filter[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(1): 101-105.
- [16] 丁伟, 阳结根, 胡枫, 等. 基于 DMD 的超短焦微型投影镜头设计[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1294-1299.
- DING Wei, YANG Jiegen, HU Feng, et al. Design of ultra-short focus micro projection lens based on DMD[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1294-1299.
- [17] 董永圣. 高清手机镜头设计及工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- DONG Yongsheng. Design and technology research of high-definition mobile phone lens[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [18] 洪洋. 一种新型便携式眼底相机的光学设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2021.
- HONG Yang. Optical design of a new portable fundus camera[D]. Suzhou: Soochow University, 2021.
- [19] 黄振永, 卢春莲, 苏秉华, 等. 基于 ZEMAX 的光学设计教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2018: 125-202.
- HUANG Zhenyong, LU Chunlian, SU Binghua, et al. Zemax-based optical design tutorial[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2018: 125-202.
- [20] ANDERSEN T B, GRANGER Z A. Camera system MTF: combining optic with detector[J]. SPIE, 2017, 10375: 69-78.
- [21] KUCUKCELEBI D. Optical design of an athermalised

- dual field of view step zoom optical system in MWIR[J]. SPIE, 2017, 10375: 159-167.
- [22] 罗朝, 梁海锋, 蔡长龙, 等. 紧凑式多光谱成像系统设计和优化[J]. 光学技术, 2023, 49(2): 143-149.
- LUO Zhao, LIANG Haifeng, CAI Changlong, et al. Design and optimization of compact multispectral imaging systems[J]. Optical Technique, 2023, 49(2): 143-149.
- [23] HU Y, HUO J, CHENG B. Design of a hybrid refractive/diffractive lens system for broadband UV[J]. Sensors, 2022, 23(1): 143.
- [24] 刘璐, 胡斌, 周峰, 等. 二维大视场紧凑型离轴四反光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(1): 73-84.
- LIU Lu, HU Bin, ZHOU Feng, et al. Design of two dimensional large field of view compact off-axis quad-inverse optical system[J], Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(1): 73-84.
- [25] MAO S, NIE H, LAI T, et al. Computational imaging in dual-band infrared hybrid optical system with wide temperature range[J]. [Sensors](#), 2022, 22(14): 5291.