

基于光栅光谱的中药光谱成像检测装置的设计

王琳¹ 马骥³ 庞其昌^{2*} 赵静⁴ 崔代军²

¹ 中山大学南方学院电子通信与软件工程系, 广东 广州 510970

² 暨南大学广东省高等学校光电信息与传感技术重点实验室, 广东 广州 510630

³ 南方医科大学中医药学院, 广东 广州 510515

⁴ 华南农业大学应用物理系, 广东 广州 510640

摘要 针对目前中药市场上存在的中药材质量问题,设计了一套基于推扫式光谱成像技术的光栅光谱成像装置。采用光栅分光,利用电控位移台在空间一维方向上扫描成像,通过图像拼接后获取了中药的光谱立方体。该装置成本低,无需特殊环境即可实现对中药的快速、无损检测。所测试系统参量包括定标波长、系统光谱响应范围、光谱分辨率、空间分辨率和系统稳定性等。以西洋参为例进行检测,得到了西洋参的光谱图像及其对应的光谱立方体,据此绘制其特征光谱曲线和空间荧光强度分布图像,得出了中药材西洋参的光谱特征和其主要活性成分人参皂甙的空间分布。

关键词 成像系统;光谱成像;光栅光谱仪;特征光谱曲线;中药检测

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.041101

Design of the TCM Spectral Imaging Detection Apparatus Based on Grating Spectrum

Wang Lin¹ Ma Ji³ Pang Qichang² Zhao Jing⁴ Cui Daijun²

¹ Department of Electronics Communication and Software Engineering,

Nan Fang College of Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510970, China

² Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510630, China

³ College of Traditional Chinese Medicine, Southern Medical University, Guangzhou, Guangdong 510515, China

⁴ Department of Applied Physics, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract In order to identify the quality of medical materials in current market of traditional Chinese medicine (TCM), a grating spectrum imaging device based on sweeping-style spectrum imaging technology is designed. It can use electrically-controlled displacement platform to scan the sample and form an image in the one-dimensional spatial direction by taking the advantage of prismatic grating. Then, the TCM's spectrum cube is obtained through image joining together. This device has a low cost and can realize nondestructive detection of TCM rapidly without particular laboratory environment. The detected parameters are as follows: the response range of system's spectrum, spectral resolving rate, spatial resolving rate and the stability of the whole system. We take *Panax quinquefolium* as an example to detect and then combine its spectral images to form the spectrum cube. Its spectral characteristics and spatial distribution of its total saponins are obtained by describing the characteristic spectrum curve and spatial distribution imaging of fluorescence intensity.

Key words imaging system; spectral imaging; grating spectrometer; characteristic spectrum curve; traditional Chinese medicine identification

OCIS codes 110.2970; 300.6170

收稿日期: 2012-12-19; 收到修改稿日期: 2013-01-18; 网络出版日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(60908038)和广州市农业科技计划(2012B040302002)资助课题。

作者简介: 王琳(1985—),女,硕士,助教,主要从事光谱图像检测方面的研究。E-mail: wlhgnc@163.com

* 通信联系人。E-mail: tpqch@jnu.edu.cn

1 引言

随着中药产业的快速发展,中药的质量控制也越来越受到高度重视,已成为研究的热点之一。而中药成分非常繁杂,单以一种成分来表达其质量是不够准确和全面的^[1]。因此,从宏观角度对样品进行整体信息的分析鉴别与鉴定成为必然的发展趋势。中药指纹图谱是一种综合、量化的鉴定手段,它是建立在中药化学成分系统研究的基础上用于评价中药及中药制剂真伪和品质的方法。目前,中药指纹图谱成为通行的控制中药质量最有效的方法^[2~4]。

应用光谱成像技术来构建中药指纹图谱可以提供中药丰富的整体信息,有利于综合评价中药的品质和特性,具有全面、快速、无损以及无污染的优点^[5,6]。首先设计光谱成像装置来获取光谱图像;然后提取光谱图像中有效像素点的区域;最后,由所获取的光谱立方体绘制中药的特征光谱曲线和空间荧光强度分布图作为评价中药质量的依据^[6]。其中,光谱立方体是中药特征指纹图谱的数据源,获取光谱立方体是应用光谱成像技术检测中药的关键,有助于高效快速地提取有效像素区域和绘制中药特征指纹图谱。

本文设计了一种基于光栅分光的推扫式光谱成像实验装置。采用光栅分光,电控位移台进行空间推扫,面阵 CMOS 接收信号,计算机完成图像拼接。采用光栅分光的优势是其色散本领大,产生的光谱均匀展开、畸变低,像质高^[7,8],且用光栅光谱仪来设计成像光谱装置的成本低,无需特殊实验环境,将更有利于光谱成像技术在中药领域的成果转化和实用化推广。实验结果表明该原理型装置可以满足中药材检测的基本要求,且装置的进一步小型化、便捷化和实用化对中药质量的控制领域将具有深远的意义。

2 系统设计

2.1 系统光路图

光栅光谱成像装置的光学系统由成像物镜、入射狭缝、准直物镜、聚焦物镜、平面光栅、出光口、光锥和 CMOS 面阵接收器等组成。系统的光路图如图 1 所示。

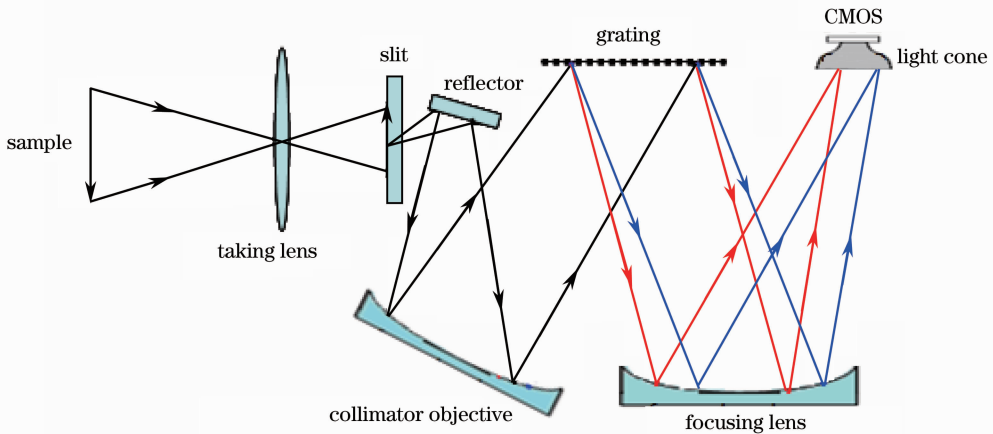


图 1 系统光路图

Fig. 1 Optical-path diagram of the system

2.2 系统组成部件

系统各组成部件的选择和部件的基本参数如表 1 所示。

2.3 系统结构和工作原理

光栅光谱成像实验装置采用光栅分光,靠机械推扫来完成对空间信息的采集。仪器主要由光源、光栅光谱仪、面阵接收器、电控位移台、控制和数据处理计算机组成^[9]。光栅光谱成像装置的原理框图如图 2 所示。

将放好样品的样品池放置在电控位移台(PSA150-11-X)上,光源照射样品表面,成像物镜将样品在狭缝处成像,经准直后进入光栅光谱仪分光,通过计算机控制 CMOS 面阵接收器(MV130-UM)和电控位移台同步联动实现空间信息的采集。该成像光谱仪光谱维和空间一维的成像由光栅分光系统和 CMOS 面阵接收器来完成,空间另一维的成像由电控位移台沿垂直于狭缝的方向推扫完成,这样就得到样品在可见光波段的

三维整体信息。通过 VC++ 平台自行设计拼接软件对采集的空间数据进行图像拼接处理来获取样品的光谱立方体。

表 1 系统组成部件

Table 1 Components of system

Component part	Model	Manufacturer	Main parameters
Standard light source	LHM254	Zolix	Power: 3 W; Working current: 10 mA
Grating spectrometer	SGM200	Zolix	Wavelength range: 380~760 nm; Spectral resolution: 1.2 nm
Plane array receiver	MV-130UM	Microvision	Signal-to-noise ratio (SNR): higher than 52 dB; picture size: 1280 pixel×1024 pixel; time of exposure: 60 μ s~2000 ms
Motorized positioning system	PSA 150-11-X	Zolix	Scanning accuracy: 0.01 mm; maximum scanning speed: 40 mm/s

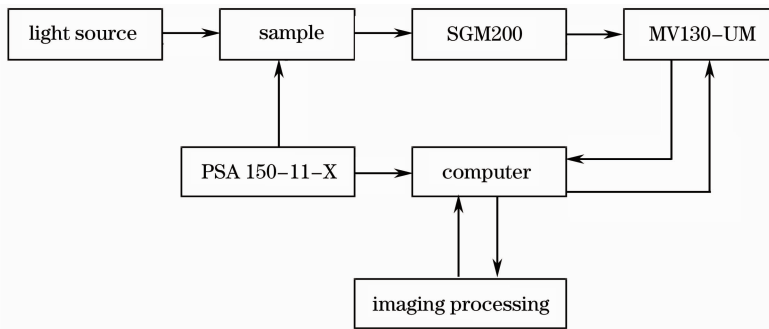


图 2 光栅光谱成像装置结构框图

Fig. 2 Block diagram of the grating spectrum imaging device

2.4 操作平台设计

操作平台即光栅光谱成像系统的软件控制界面,具有实现面阵接收器和电控位移台的同步联动控制和数据采集处理两大功能。系统软件操作界面如图 3 所示。

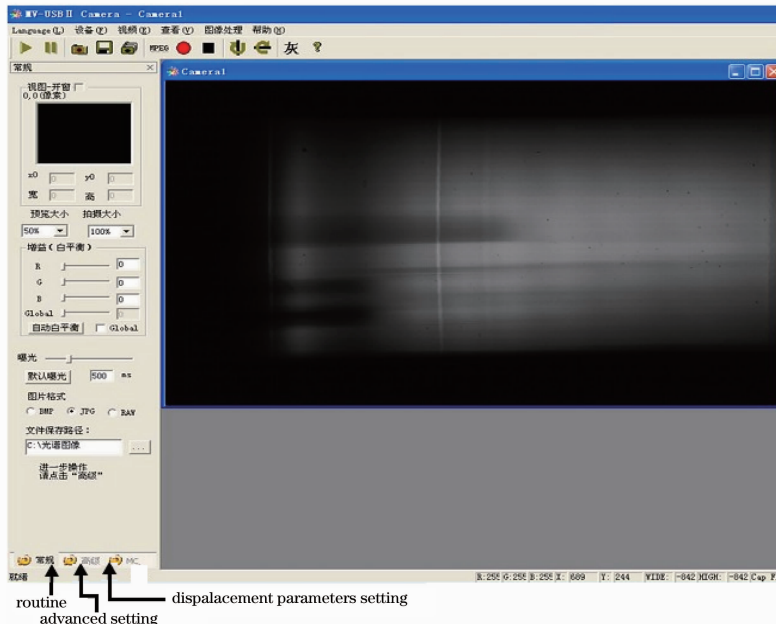


图 3 系统软件操作界面

Fig. 3 Interface of system software operation

软件操作界面控制对话框包括常规参数设置,高级参数设置和位移台参数设置 3 个选项卡。在常规参数设置选项卡里可以实现对图像大小、增益、曝光时间、图像保存路径和格式等参数的设置;在高级参数设置选项卡里可以实现对图像采集帧率、移动步进量、移动步进长度和移动步进频率的设置;在位移台参数设置选项卡里可以设置数据采集的启动和终止按钮,实现同步联动控制。软件操作界面左侧区域为参数对话框,右侧区域为图像显示区。通过拼接软件拼接构成的中药光谱立方体来构建中药特征指纹图谱,实现对中药的无损、快速检测。在软件界面嵌入数据处理模块后还可以实现对样品特定区域的光谱信息和样品主要活性成分空间分布信息的获取等功能^[10,11]。

2.5 参数设计

光栅光谱成像实验装置的主要参数包括光谱分辨率、光谱响应范围、响应灵敏度、响应频率和信噪比等。依据高光栅成像的光谱分辨率为 $\Delta\lambda/\lambda=0.01$,选择中心波长为 550 nm,初步设定系统的光谱分辨率为 5.5 nm^[12]。系统主要用于获取被检中药材的可见光信息,因此系统的光谱响应范围需要覆盖可见光波段 400~720 nm 的区间。系统的响应灵敏度主要由 CMOS 面阵接收器来决定,同时会受到成像镜头和光栅的影响,可以通过增大光圈和增加曝光时间等方法来提高系统的响应灵敏度^[13~15]。被检中药材是静止目标,且在检测时间段内其基本性质并不发生变化,因此对系统的响应频率并无特殊要求。系统的信噪比主要由 CMOS 面阵接收器来决定,MV130-UM 的信噪比大于 52 dB,参照液晶光谱成像系统^[16],结合中药材检测的需要,系统的信噪比要求不低于 40 dB。

3 系统测试

3.1 定标波长

低压汞灯光源可以提供 365.02、404.66、435.84、546.07、576.96、579.07 nm 等多条汞灯的特征谱线,如图 4 所示。用汞灯的光谱序列和图像坐标序列进行标定,分别计算每相邻两条谱线在图像上的距离与波长差的比值约为 3.17,故可以认为波长序列与图像的空间坐标关系是线性函数,公式为

$$\lambda = \frac{1}{3.17}x + 351 \text{ (nm)}. \quad (1)$$

CMOS 面阵接收器所得到的光谱图像的波长均匀分布。标准汞灯的几条特征谱线均符合波长公式,实验结果也证明光栅的色散和产生的光谱是线性的。

3.2 光谱分辨率

SGM200 光栅光谱仪自身的光谱分辨率为 1.2 nm,系统的光谱分辨率与光栅光谱仪有关。为了调节出射端的成像质量,在紧贴狭缝的位置上放一个带有 0.5 mm 宽狭缝的片状遮光板[图 5(a)],采用低压汞灯标准光源对遮光板照明的方式进行测试。调节成像镜头和光栅光谱仪的相对位置使得遮光板及遮光板上的狭缝成像清晰,如图 5 所示。

采集汞灯光源经狭缝调制后的光谱图,并将其光谱图转化为低压汞灯的光谱曲线,如图 6 所示。根据汞灯线状谱的光谱响应的半峰全宽(FWHM)来衡量并计算光谱分辨率,最终得出该光栅光谱成像装置系统的光谱分辨率为 15 nm。

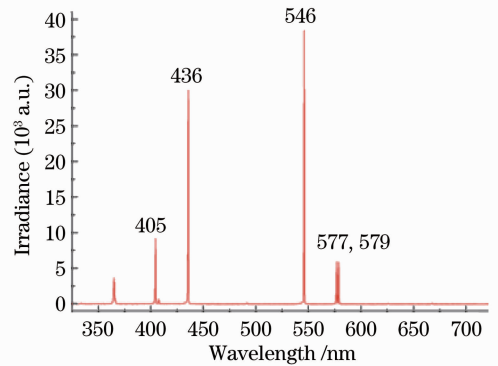


图 4 标准汞灯的特征谱线

Fig. 4 Characteristic spectrum of standard mercury lamp

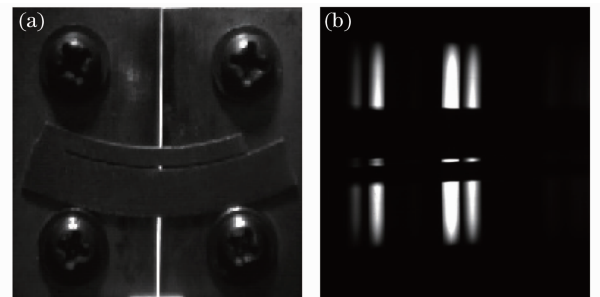


图 5 (a)遮光板示意图; (b)高空间分辨率像
Fig. 5 (a) Image of mask; (b) image of hyper-spatial-resolution

3.3 光谱响应范围

系统的光谱响应范围由光栅光谱仪和 CMOS 面阵接收器的光谱范围来决定。卓立汉光公司的 SGM200 的光谱范围为 380~760 nm, 维视图像的工业黑白 CMOS 面阵接收器的光谱响应范围约为 380~1030 nm。通过精确计算得出探测器接收波长的覆盖范围为 351~753 nm, 分析结果是由于探测器接收面后移后, 出光口的光束发生了扩散和偏移, SGM200 光栅光谱仪在小于 380 nm 处会出现光栅的二级光谱, 影响光谱数据的真实性。因此, 本文设计的原理型光栅光谱成像装置系统的波长覆盖范围应为 380~753 nm。

3.4 稳定性测试

利用低压汞灯标准光源进行系统稳定性测试, 每 12 h 进行一次检测, 每次重复测试 5 次并求平均, 连续测试 5 天, 通过计算光谱曲线的相似度来衡量该系统的稳定性。结果为低压汞灯光源的 10 条光谱曲线相似度均大于 98.5%。这表明系统具有良好的稳定性, 能够满足光谱成像技术检测中药材的基本要求。

3.5 系统基本参数

对光栅光谱成像装置的检测结果显示, 系统的基本参数为: 光谱分辨率 15 nm; 光谱响应范围 380~753 nm; 信噪比大于 40 dB; 曝光时间在 60 μ s~2000 ms 间可调。

4 实验

4.1 系统搭建与实验方法

按光路图搭建好装置, 通过标准分辨率卡进行调焦使狭缝的光谱成像清晰, 固定好装置。取市售西洋参饮片, 将其放在样品池上, 采用 254 nm 紫外光源照射激发西洋参饮片产生荧光, 将样品池边缘调节到正对狭缝位置, 计算机同步联动控制电控位移台开始扫描。实验过程中设置 CMOS 面阵接收器的曝光时间为 200 ms, 电控位移台的推扫步长为 0.1 mm, 调节狭缝宽为 50 μ m, 推扫时间间隔为 4 s。从目标物右侧开始扫描, 一共采集 356 frame 狭缝光谱图[图 7(a)], 然后在每帧狭缝光谱图中提取各波长处的两列像素通过 VC++ 软件平台拼图, 选取波长间隔为 3 nm, 狭缝光谱图拼接后构成了由 124 帧按照波长序列排列的中药西洋参的光谱立方体, 如图 7(b)所示。

由图 7(b)可知, 面阵接收器所采集到的狭缝像通过软件拼接得出的西洋参饮片图像清晰可见。实验结

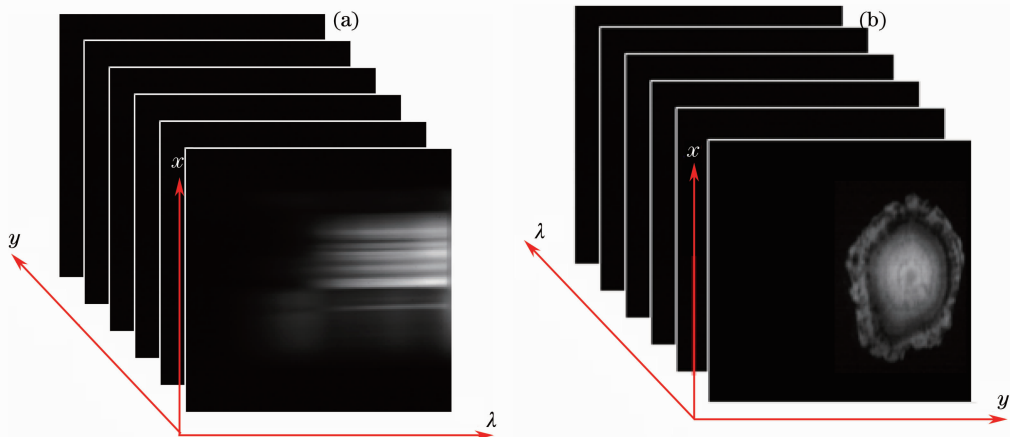


图 7 (a) 西洋参系列狭缝光谱图; (b) 狭缝光谱图拼接的光谱立方体

Fig. 7 (a) Slit spectral images of *Panax quinquefolium*; (b) montage spectral images of *Panax quinquefolium*

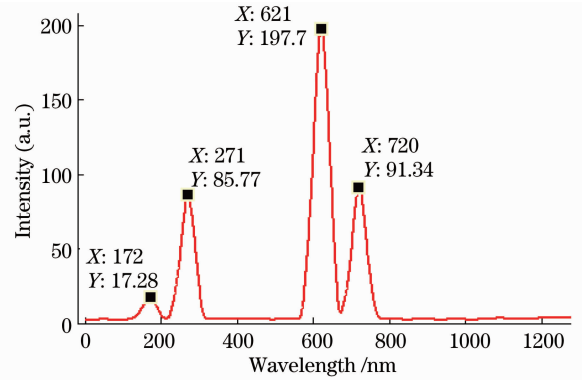


图 6 汞灯光源经狭缝调制后的光谱曲线
Fig. 6 Spectrum of mercury lamp after the modulation by slit

果表明:原理型光栅光谱成像装置能够实现中药材西洋参光谱立方体的获取。

4.2 光谱立方体数据处理

鉴别中药要通过获取的光谱立方体绘制中药特征指纹图谱,包括特征光谱曲线和空间荧光强度分布图,特征光谱曲线可以确定西洋参的光谱特征,空间荧光强度分布图可以直观显示样品主要活性成分的空间分布信息。在 254 nm 紫外光源的激发下,中药荧光特征指纹图谱即中药特征光谱曲线可以表征中药材西洋参的主要活性成分人参总皂甙。以波长为横坐标,以拼接光谱立方体中图像的灰度值所反映的样品荧光强度为纵坐标来绘制中药材西洋参的特征光谱曲线,在同样的实验条件下,连续拍摄测试西洋参样品的推扫光谱图像 5 组,数据处理所得 5 次实验特征光谱曲线结果完全吻合,如图 8(a)所示。曲线反映了中药材西洋参的主要活性成分人参总皂甙的特征指纹图谱,查阅资料在 465~495 nm,500~530 nm 和 690~720 nm 可见光范围内西洋参主要活性成分人参总皂甙存在特征峰和特征谷^[17,18]。通过拼接后的西洋参光谱立方体图像来绘制特征光谱曲线,尽管光谱分辨率偏低,但曲线在宏观上也体现了上述特征。空间荧光强度分布图是以光谱立方体图像中每个像素点的二维空间坐标再加上对应的荧光强度构成的能够反映空间信息的分布图像。空间分布图像可以反映西洋参切片样品主要活性成分人参总皂甙在药材中的整体分布状况。图 8(b)为西洋参活性成分人参总皂甙在 550 nm 波长下的荧光光谱光强分布图,其荧光光谱的光强同样也呈现出以形成层为界,内侧芯部高、外侧木部低的特点^[19],这说明光栅光谱成像装置也可以用于检测西洋参中主要活性成分人参总皂甙的空间分布,对于高效合理地选取中药材的有效部位具有非常重要的意义。

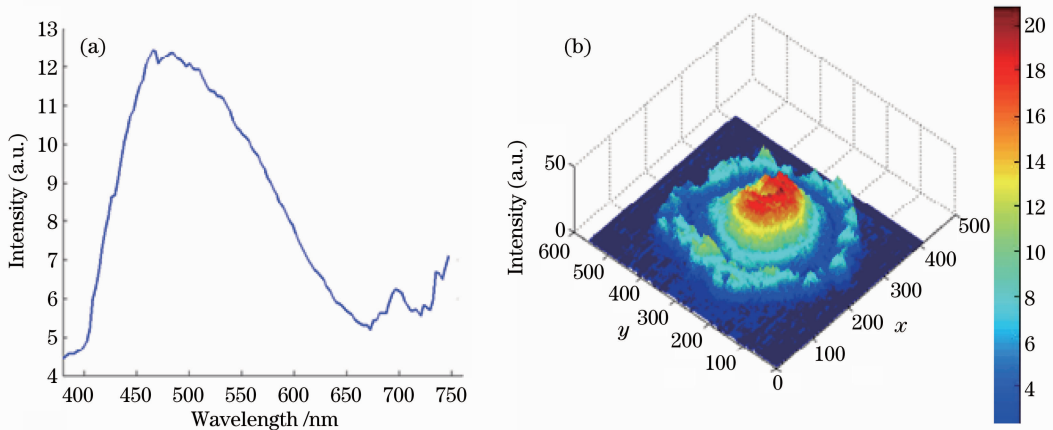


图 8 (a)西洋参特征光谱曲线;(b)西洋参空间荧光强度分布图

Fig. 8 (a) Characteristic spectrum of *Panax quinquefolium*; (b) spatial distribution of fluorescence intensity in *Panax quinquefolium*

5 结 论

本文设计的光谱测量系统是采用光栅分光,然后利用推扫的方式对样品采集连续光谱的成像装置。利用光栅光谱仪作为主要器件搭建出光栅光谱成像装置,整个装置可以实现对中药样品的清晰成像,并获取中药的光谱立方体,实现了对中药材西洋参的检测。实验结果表明该装置能够应用在中药材检测的实际领域中,不仅可以检测样品的主要活性成分,而且能够描绘出样品主要活性成分的空间分布信息,检测过程无损、快速,检测方法可行,检测结果合理。由于本设计中使用的普通光栅光谱仪的输出光谱像垂直方向和平行方向的像面不重合,严重影响了装置的成像质量和光谱分辨率,虽然可基本满足目前的实验需要,但达不到理想效果。通过改用成像光栅光谱仪代替目前使用的光栅光谱仪可进一步提高装置的光谱分辨和空间分辨性能,有望加快装置的便携化和实用化进程。

参 考 文 献

- 1 Yan Dan, Xiao Xiaohu, Jin Cheng *et al.*. Challenge and development of quality administration mode of Chinese materia medica[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2006, **37**(6): 806~809

- 鄢丹, 肖小河, 金城等. 论中药质量管理模式的挑战与发展[J]. 中草药, 2006, **37**(6): 806~809
- 2 Zheng Heng, Wei Ribao, Chen Xiangmei. Traditional Chinese medicine quality standard and TCM characteristic spectrum [J]. *China J. Hospital Pharmacy*, 2003, **23**(2): 112~113
- 郑恒, 魏日胞, 陈香美. 中药质量标准与中药指纹图谱[J]. 中国医院药学杂志, 2003, **23**(2): 112~113
- 3 Cui Daijun, Pang Qichang, Ma Ji *et al.*. Rapid and nondestructive detection of quality of panax quinquefolium effected by humidity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 093001
- 崔代军, 庞其昌, 马骥等. 湿度对西洋参品质影响的快速无损检测[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(9): 093001
- 4 Wu Yutian. The modernization of traditional Chinese medicine and TCM fingerprint analysis[J]. *Chinese J. Integrated Traditional and Western Medicine*, 2002, **22**(9): 645~646
- 吴玉田. 中医药现代化与中药指纹图谱分析[J]. 中国中西医结合杂志, 2002, **22**(9): 645~646
- 5 Wei Wang, Yuqing Zhao, Elizabeth R. Rayburn *et al.*. *In vitro* anti-cancer activity and structure-activity relationships of natural products isolated from fruits of *Panax ginseng*[J]. *Cancer Chemother. Pharmacol.*, 2007, **59**(5): 589~601
- 6 Zhao Jing, Pang Qichang, Ma Ji *et al.*. *In vivo* identification of *Radix panacis quinquefolii* by spectral imaging technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(1): 210~213
- 赵静, 庞其昌, 马骥等. 光谱成像技术无损鉴别西洋参饮片的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(1): 210~213
- 7 Li Zilei, Wang Lin, Pang Qichang *et al.*. *Panax quinquefolium's* active ingredients detecting method based on LCTF spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3622~3626
- 李子雷, 王琳, 庞其昌等. 基于液晶光谱仪的西洋参品质荧光检测方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3622~3626
- 8 Wang Jianyu, Shu Rong, Liu Yinnian *et al.*. *Imaging Spectrum Technology Introduction* [M]. Beijing: Science Press, 2011. 93~99
- 王建宇, 舒嵘, 刘银年等. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 93~99
- 9 Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyper-spectral imagers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **17**(11): 2629~2637
- 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程, 2008, **17**(11): 2629~2637
- 10 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315002
- 张旭苹, 汪家其, 张益昕等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0315002
- 11 Deng Jijie, Liu Tiegeng, Yang Yong *et al.*. Embedded industry production-line image examination system based on machine visions [J]. *Computer Engineering*, 2008, **34**(4): 260~262
- 邓集杰, 刘铁根, 杨永等. 基于机器视觉的嵌入式工业在线检测系统[J]. 计算机工业, 2008, **34**(4): 260~262
- 12 J. Nella, P. D. Rey, J. W. Austin *et al.*. Hyper-Spectral Air-to-Air Missile Seeker [P]. US Patent 6079665, 2000-06-27
- 13 Tan Jiahai, Chen Yongquan, Qu Youshan *et al.*. Scientific grade CCD camera calibration system design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 85~89
- 谭家海, 陈永权, 屈有山等. 科学级 CCD 相机标定系统的设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(1): 85~89
- 14 Wang Yutian, Hu Qiaoli, Shi Junyan. Optial fiber thermometer based on fluorescence mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 655~659
- 王玉田, 胡俏丽, 石军彦. 基于荧光机理的光纤温度测量仪[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 655~659
- 15 Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Temperature insensitive fiber Bragg grating pressure sensing with plane round metal diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 80~84
- 尉婷, 乔学光, 贾振安等. 平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度补偿压强传感[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 80~84
- 16 Zhao Jing, Pang Qichang, Ma Ji *et al.*. Design of the continuous spectrum imaging apparatus based on LCTFs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 758~762
- 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
- 17 Li Qizhan, Pang Qichang, Wang Lin *et al.*. Detection and analysis for spectral imaging TCM assessing[J]. *J. Appl. Opt.*, 2011, **32**(1): 85~90
- 李启湛, 庞其昌, 王琳等. 快速中药光谱成像检测分析系统设计[J]. 应用光学, 2011, **32**(1): 85~90
- 18 Xue Yanling, Xiao Tiqiao, Du guohao *et al.*. Microscopic identification of *Panax quinquefolium* and *Panax ginseng* by X-ray phase contrast imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1828~1831
- 薛艳玲, 肖体乔, 杜国浩等. 西洋参和高丽白参的 X 射线显微鉴定研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1828~1831