

宽波段高光谱成像技术在物证检验中的应用

赵雪琚¹, 黄晓春², 王长亮^{2*}, 蔡能斌^{2*}, 尹禄³, 卢禹先³, 潘明忠^{3,4}

1. 上海市刑事科学技术研究院, 上海市现场物证重点实验室, 上海 200083
2. 上海市公安局物证鉴定中心, 上海市现场物证重点实验室, 上海 200083
3. 中国科学院上海技术物理研究所杭州大江东空间信息技术研究院, 浙江 杭州 311225
4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 高光谱成像技术在物证检验领域的应用具有重要的意义, 其不仅能够记录物证的光谱特征用以分析物质成分, 而且能够准确记录不同成分的空间分布情况, 从而实现无损、快速、定位分析物证成分的功能。高光谱成像物证检验技术的光谱检测范围通常集中在可见-近红外区域, 而现有基于高光谱成像技术的物证检测设备基本只能单独覆盖可见波段或者近红外波段, 无法实现可见-近红外的宽波段检测需求。为了拓宽成像光谱仪的检测波段范围从而实现提高物证检验精度和增加物证检验种类的目的, 首先分析了推扫式成像光谱仪的组成结构及工作原理, 剖析了直接研制宽波段成像光谱仪的技术难度和高昂成本, 最后提出了将短波段范围的 400~1 000 nm 可见高光谱成像仪和 900~1 700 nm 近红外高光谱成像仪相结合的方式实现宽波段范围的方法。通过 2 台高光谱成像设备线视场匹配将独立的 2 台设备联合作为 1 台设备使用, 采用定标板辅助装调的方法实现 2 台高光谱成像仪线视场的像素级拼接, 将设备拼接带来的误差降低到不影响输出结果的程度, 最终研制出一种波段范围可达 400~1 700 nm 的可见-近红外宽波段高光谱物证检测设备。搭建实验系统, 分别固定 2 台独立的短波段范围高光谱成像光谱仪, 利用平移台带动检材沿着垂直于线视场的方向移动实现推扫, 所获取的数据立方体具有 400~1 700 nm 的宽光谱范围, 400~1 000 nm 的光谱分辨率为 2.5 nm, 1 000~1 700 nm 的光谱分辨率为 4 nm。实验结果表明该方法的可行性, 对于宽波段高光谱成像仪的研制具有指导意义, 使高光谱成像仪在物证检验领域具有更高的应用价值和更广的应用范围。

关键词 高光谱成像; 光谱特征; 波段范围; 宽波段高光谱; 物证探测

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0674-05

引言

成像光谱技术是指既能获取目标图像又能获取目标空间各点的连续光谱信息, 并根据目标的特征光谱, 确定出目标物证成分的一种技术^[1]。成像光谱技术根据光谱分辨率又可分为多光谱成像技术、高光谱成像技术和超光谱成像技术, 其光谱分辨率分别为波长的 1/10, 1/100 和 1/1 000 数量级范围^[2]。成像光谱技术最早应用于物证鉴定领域是在 20 世纪 90 年代中期, 由 James A Janni 等提出, 但由于技术方法和仪器设备性能的限制, 这项技术当时并没有引起物证鉴定工作者的广泛关注^[3]。2003 年, 澳大利亚的 Claude Roux 等

采用光谱成像技术进行了显现指纹纹线的初步实验研究, 光谱成像装置采用液晶可调波长滤光镜(LCTF), 这一实验成为物证鉴定领域广泛研究光谱成像检验技术的开端^[4]。至今, 多光谱成像技术在物证鉴定领域的应用较为成熟^[5], 但多光谱成像技术的光谱分辨率有时难以满足物证检验需求, 虽然超光谱成像技术的光谱分辨率高于高光谱成像技术的分辨率, 但高光谱成像技术的光谱分辨率可以满足目前的物证检验需求, 因此高光谱成像技术逐步成为物证鉴定机构重点发展的研究方向^[6-8]。

目前, 可见高光谱成像仪或近红外高光谱成像仪的研发技术相对成熟, 国内几家机构能够研发并生产这 2 个光谱范围的高光谱成像仪^[9-10], 但当需要综合可见-近红外波段的特

收稿日期: 2019-01-21, 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0803806), 上海市科学技术委员会科研项目(15GJ0500100)资助

作者简介: 赵雪琚, 1987 年生, 上海市刑事科学技术研究院助理研究员 e-mail: xjzhao1201@163.com

* 通讯联系人 e-mail: liangliang0725803@sina.com; 13162056906@163.com

征光谱进行物证分析时将无法得到精确的结果。因此，覆盖可见-近红外波段的宽波段高光谱成像仪的研制对于物证检验的应用具有更高的价值。

宽波段高光谱成像仪的研制有不少难点，光栅的衍射效率、光学透镜及其材料等都是技术瓶颈。本文以自主研发的可见高光谱成像仪和近红外高光谱成像仪组合的方式，通过调整 2 台高光谱成像仪的姿态，使 2 台高光谱成像仪共视场从而达到拓宽成像光谱仪光谱范围的效果。实验结果表明该方法实现了宽波段高光谱成像设备的技术性能，并成功应用于物证检验领域。

1 高光谱成像仪工作原理

常见的推扫式高光谱成像仪的工作原理如图 1 所示。入射光由成像透镜进入入射狭缝，再经由准直透镜和分光模块，最后由聚焦透镜汇聚于探测器。由于入射狭缝的限制，高光谱成像仪的瞬时视场为图 1 中所示的 A、B 和 C 三点所在直线的线视场。

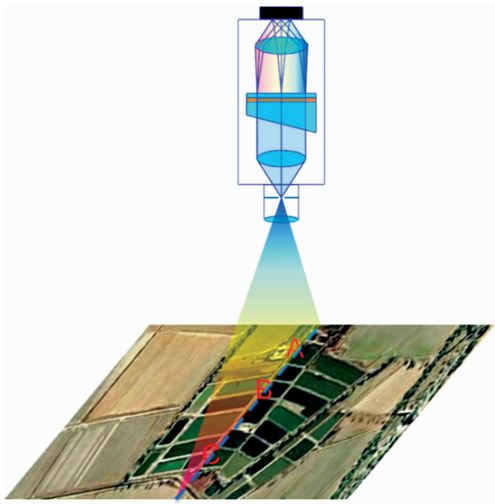


图 1 高光谱成像仪原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging spectrometer

瞬时线视场的图像由高光谱成像仪的分光模块色散后，成像于探测器靶面，其中一维是线视场图像所在的空间维，另一维是线视场图像色散后的光谱维，如图 2 所示。

探测器接收的瞬时线视场数据即单帧图像数据，空间维用于显示该线视场图像，光谱维用于显示该空间维每个点的光谱数据，光谱维中每一个工作波段称为一个光谱通道，如图 2 中的彩色条带所示。若高光谱成像仪的光谱分辨率为 k (k 为 λ_1 或 λ_2 的 $1/100$ 数量级)，光谱范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ，则光谱通道 1 的波长范围为 $\lambda_1 \sim (\lambda_1 + k)$ ，光谱通道 2 的波长为 $(\lambda_1 + k) \sim (\lambda_1 + 2k)$ ， \dots ，光谱通道 n 的波长为 $(\lambda_1 + nk) \sim \lambda_2$ 。

高光谱成像仪通过推扫的方式获取整幅图像的高光谱数据，可以利用机身或待测物的移动实现推扫成像，扫描方向为垂直于线视场方向，所获取的高光谱数据是三维数据，称之为数据立方，如图 3 所示。高光谱成像仪相对于被测物体

沿空间维 x 方向推扫，每次获取一维空间维 y 图像，经推扫后获取空间维 x 和空间维 y 的二维图像。

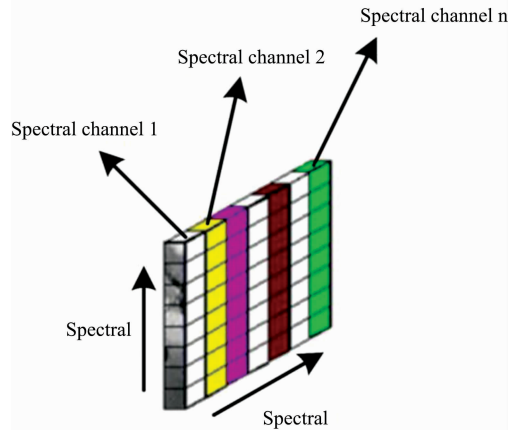


图 2 高光谱成像仪探测器获取的单帧数据示意图
Fig. 2 Single-frame data acquired by detector of hyperspectral imaging spectrometer

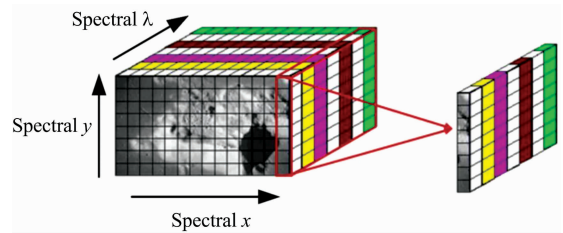


图 3 高光谱数据立方示意图
Fig. 3 Hyperspectral data cube

数据立方具有“图谱合一”的特点，对应于目标的每一个空间点 (x, y) ，均有一个连续的、高光谱分辨率的光谱曲线与之对应。因此，通过高光谱成像仪既能获取物体的空间信息，同时能够获取物体的光谱信息。

高光谱成像仪空间性能的参数主要包括总视场 (FOV) 和瞬时视场 (IFOV)，如图 4。

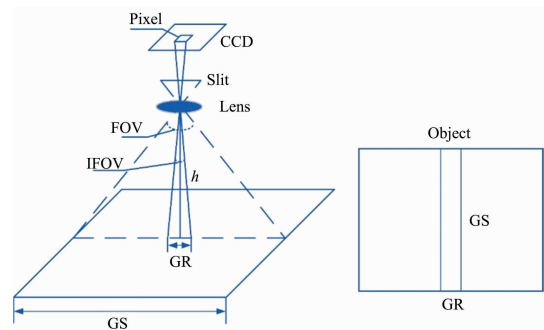


图 4 高光谱成像仪空间性能参数
Fig. 4 Spatial parameters of hyperspectral imaging spectrometer

图 4 中 Gh 是成像镜头距物体的距离，总视场 FOV 决定了高光谱成像仪的扫描幅宽 GS，瞬时视场 IFOV 决定了

高光谱成像仪的空间分辨率 GR, 高光谱成像仪每次成像的线视场对应的物体大小为 $GS \times GR$ 。

2 宽波段高光谱成像仪实现方法

高光谱成像仪由光学透镜、分光模块、探测器等组成, 若研制宽波段高光谱成像仪, 分光模块中的光栅需要满足宽波段范围内较高的衍射效率, 光学透镜需要在宽波段内具有较高的成像质量, 大面阵的探测器同样是需要攻克的难题。因此, 采用可见高光谱成像仪和近红外高光谱成像仪结合的方式实现宽波段高光谱成像效果。

将自主研发的 400~1 000 nm 可见高光谱成像仪和 900~1 700 nm 近红外高光谱成像仪进行组合, 2 台高光谱成像仪的实物图和研制参数分别如图 5 和表 1 所示。

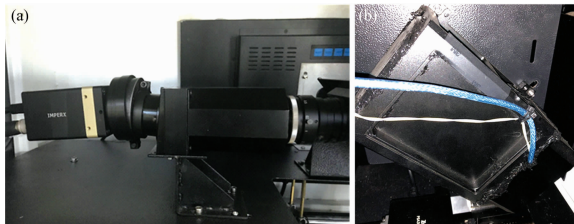


图 5 高光谱成像仪实物图

(a): 400~1 000 nm; (b): 900~1 700 nm

Fig. 5 Hyperspectral imaging spectrometer

(a): 400~1 000 nm; (b): 900~1 700 nm

表 1 高光谱成像仪参数表

Table 1 Hyperspectral imager parameter table

| 名称 | 参数 | 数值 |
|-----------|------------|---------------------|
| 可见高光谱成像仪 | 波段范围 | 400~1 000 nm |
| | 光谱分辨率 | 优于 3 nm |
| | 工作距离 | 大于 300 mm |
| | 瞬时视场(IFOV) | 0.27 mm@300 mm 工作距离 |
| | 总视场(FOV) | 116 mm@35 mm 镜头 |
| 近红外高光谱成像仪 | 波段范围 | 900~1 700 nm |
| | 光谱分辨率 | 优于 4 nm |
| | 工作距离 | 113 mm |
| | 瞬时视场(IFOV) | 0.15 mm |
| | 总视场(FOV) | 48 mm |

2 台高光谱成像仪需要拍摄同一物体的同一视场, 因近红外高光谱成像仪的工作距离只有 113 mm, 可见高光谱成像仪的工作距离大于 300 mm, 为了保证光路无遮挡, 组合后的空间小, 装调方便, 便可见高光谱成像仪由平面反射镜折转的方式对准待测物体, 近红外高光谱成像仪则斜视对准待测物体, 2 台高光谱成像仪的组合光路图如图 6 所示。高光谱成像仪固定, 待测物体置于电动平移台上实现推扫从而获取三维数据立方体。

2 台高光谱成像仪具有各自的线视场, 按图 6 所示的光路装调后, 还需要微调 2 台成像光谱仪的姿态, 直至线视场匹配。视场匹配调节包括视场平行和视场重合两个步骤, 视

场平行调节至关重要, 若 2 台高光谱成像仪的线视场未调至平行, 获取的空间维数据具有一定角度偏差, 不能实现两组空间维和光谱维数据对准, 则无法获取两组高光谱数据。我们采用定标板辅助调节高光谱成像仪视场平行, 调节的过程如图 7 所示。

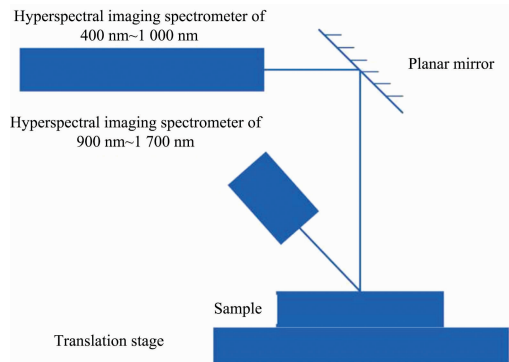


图 6 2 台高光谱成像仪组合光路图

Fig. 6 Optical Path of the two hyperspectral imaging spectrometer

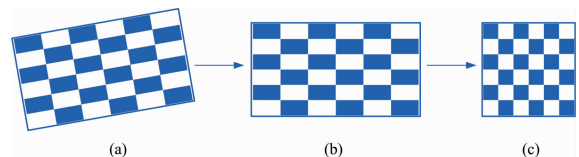


图 7 定标板辅助调节视场平行示意图

Fig. 7 Parallel adjustment by calibration board

未经调节姿态的高光谱成像仪所获取的成像数据如图 7(a)所示, 定标板的图像呈倾斜拉伸状态, 首先调节 2 台高光谱成像仪姿态, 直至获取的两组图像数据如图 7(b)所示, 定标板的图像只呈现拉伸状态, 其次调节 2 台高光谱成像仪的帧频和电动平移台的移动速度, 直至两组成像数据如图 7(c)所示。其中, 图像的倾斜和拉伸由拍摄的正方形定标板在探测器上所占据元数量来准确判断。最后通过调整平面反射镜的角度调节视场重合。

3 实验验证

搭建实验平台, 如图 8 所示。实验器材包括 400~1 000 nm 高光谱成像仪、900~1 700 nm 高光谱成像仪、卤钨灯光源及风扇、高精度直线平移台。物体置于高精度平移台上, 通过控制平移台移动, 扫描被检测物体。

由 Labview 平台编写测量软件, 界面如图 9 所示。分别包括 400~1 000 和 900~1 700 nm 高光谱成像仪图像显示窗口、400~1 000 和 900~1 700 nm 高光谱成像仪光谱曲线显示窗口。图像显示窗口可以显示任意单波段的图像, 光谱曲线显示窗口可以显示任意空间点光谱曲线。

选择 4 种不同种笔迹作为待测物体, 由于 2 台高光谱成像仪的视场大小不同, 近红外高光谱成像仪的视场要小于可见高光谱成像仪的视场, 因此以近红外高光谱成像仪的视场

为基准,裁剪可见高光谱成像仪的视场。测试结果用高光谱数据处理软件 ENVI 打开,裁剪后的图像信息如图 10 所示。

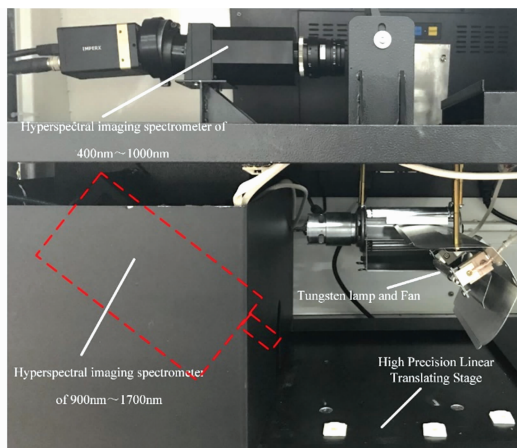


图 8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform

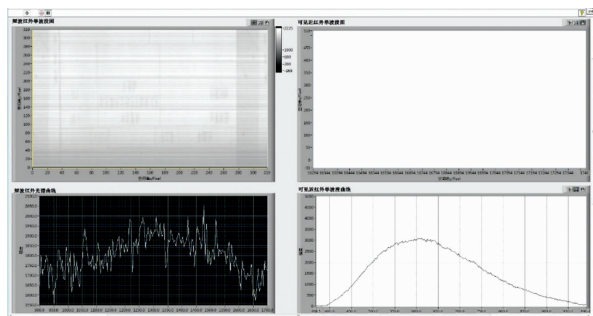


图 9 测量软件界面

Fig. 9 The software of measurement

根据图 10 中的 4 种笔迹,对应的光谱曲线如图 11 所示。光谱曲线的波长范围是 400~1 700 nm,是经过 2 台高光谱成像仪获取的光谱数据拼接后的结果。

图 11 中所示的光谱曲线,表明本方法可以实现宽波段高光谱数据的获取。

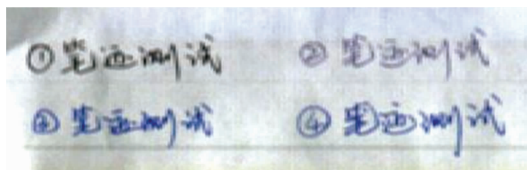


图 10 高光谱成像仪图像测试结果

Fig. 10 Image testing results of Hyperspectral imaging spectrometer

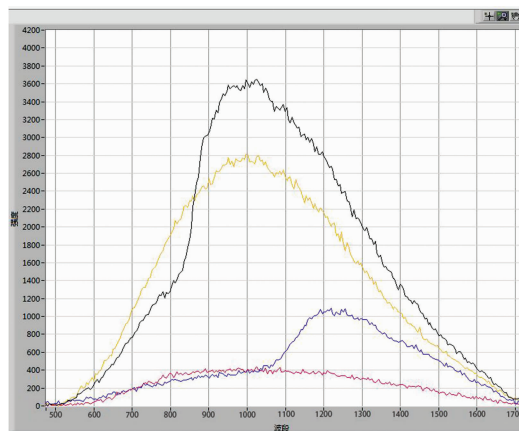


图 11 四种笔迹的拼接光谱曲线

Fig. 11 The spectral curves of four handwriting

4 结 论

结合可见高光谱成像仪和近红外高光谱成像仪,实现可见-近红外宽波段高光谱成像仪的研制。通过调整 400~1 000 和 900~1 700 nm 高光谱成像仪的姿态、拍摄帧频和电动平移台的移动速度,计算推扫图像中拍摄的正方形定标板在探测器上所占像元数量,判断两台高光谱成像仪的线视场是否平行,线视场平行后再调整平面反射镜的角度,直至线视场相互重合。实验结果得到 4 种笔迹的空间二维图像和任意空间点 400~1 700 nm 的光谱曲线,证明该方法能够实现宽波段高光谱数据的获取,使高光谱成像仪在物证鉴定领域的应用范围更广。

References

- [1] ZHANG Bing(张 兵). Journal of Nanjing University of Information Science and Technology • Natural Science Edition(南京信息工程大学 • 自然科学版), 2018, 10(1): 1.
- [2] GU Ju-xing(顾聚兴). Infrared(红外), 2005, (3): 46.
- [3] XU Xiao-jing, HUANG Wei(许小京, 黄 威). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2012, 41(12): 3280.
- [4] Exline D L, Wallace C, Roux C, et al. J. Forensic. Sci., 2003, 48(5): 1.
- [5] LIU Shuo, TAN Tie-jun(刘 烁, 谭铁军). Forensic Science and Technology(刑事技术), 2010, (5): 48.
- [6] HUANG Wei, LUO Xu-dong(黄 威, 罗旭东). Police Technology(警察技术), 2014, (6): 41.
- [7] SUN Mei, CHEN Xing-hai(孙 梅, 陈兴海). Science Technology and Engineering(科学技术与工程), 2015, (22): 167.
- [8] GAO Ze-dong, HAO Qun, LIU Yu, et al(高泽东, 郝 群, 刘 宇, 等). Metrology & Measurement Technology(计测技术), 2019, (4): 24.

[9] Huang Wei, Wang Guiqiang, Xu Xiaojing, et al. *Advanced Materials Research*, 2011, 174: 89.

[10] Huang Wei, Wang Guiqiang, Xu Xiaojing, et al. *Proc SPIE*, 2010, 7850: 7850OW.

Development of a Wide Range Hyperspectral Imager for Evidence Examination

ZHAO Xue-jun¹, HUANG Xiao-chun², WANG Chang-liang^{2*}, CAI Neng-bin^{2*}, YIN Lu³, LU Yu-xian³, PAN Ming-zhong^{3, 4}

1. Shanghai Research Institute of Criminal Science and Technology, Shanghai Key Laboratory of Crime Scene Evidence, Shanghai 200083, China
2. Shanghai Institute of Forensic Science, Public Security Bureau, Shanghai Key Laboratory of Crime Scene Evidence, Shanghai 200083, China
3. Hangzhou Academy of Spatial Information Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 311225, China
4. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The hyperspectral imaging technology is significant in the field of evidence examination. Because of the spectral characteristics and spatial distribution characteristics, non-destructive, rapid and positioning analysis of material evidence can be realized. The spectral detection range of hyperspectral imaging in evidence examination usually concentrates on visible-near infrared region. However, the existing material evidence testing equipment based on hyperspectral imaging technology can only cover visible or near infrared band alone, which cannot meet the wide-band detection requirements. In order to widen the detection band so that the accuracy of evidence examination can be improved, this paper firstly analyses the composition, structure and working principle of push-broom imaging spectrometer, secondly analyses the technical difficulty and high cost of developing wide-band imaging spectrometer, and finally puts forward the idea of combining the visible imaging spectrometer and the near infrared imaging spectrometer to achieve a wide band range. Two independent equipments are combined as one equipment by matching the line-of-sight of two imaging spectrometer. The calibration board is used to realize the pixel-level splicing of line-of-sight so that the error caused by equipment splicing is reduced to the extent that it does not affect the output results. Finally, an evidence detection device of visible-near infrared wide-band hyperspectral imaging spectrometer with a band range of 400~1 700 nm is developed. Two independent short-band hyperspectral imaging spectrometers are fixed, and a moving platform is used to drive the sample along the direction perpendicular to the line-of-sight. The obtained data cube has a broad spectral range of 400~1 700 nm, the spectral resolution of 400~1 000 nm is 2.5 nm, and the spectral resolution of 1 000~1 700 nm is 4 nm. The experimental results show that the method is feasible which has guiding significance for the development of broad band hyperspectral imaging spectrometer. It makes the imaging spectrometer have higher application value and wider application scope in the field of evidence examination.

Keywords Hyperspectral imaging; Spectral characteristics; Band range; Wide range hyperspectral; Evidence detection

(Received Jan. 21, 2019; accepted Apr. 16, 2019)

* Corresponding authors