

用于水果品质检测的小型成像光谱仪

刘玉娟^{1,2}, 唐玉国^{1*}, 崔继承^{1,2}, 巴音贺希格¹

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘 要 利用成像光谱可同时获得水果的成像信息和光谱信息, 实现水果外部和内部品质的高精度、无损伤、无污染的大面积瞬态检测。为了获得水果的成像光谱, 设计了一种以自主研发的凸面光栅作为核心元件的小型成像光谱仪, 它具有成像质量好、体积小、重量轻等优点, 光谱分辨率在 578 nm 波长处达 2.1 nm, 光谱谱线弯曲和色畸变均小于 0.6%。对该小型成像光谱仪进行了检测和苹果成像光谱测量实验, 结果表明: 该成像光谱仪满足设计要求且可以快速的获得苹果的高精度成像光谱, 从而进行水果的品质检测。

关键词 成像光谱仪; 水果品质; 无损检测; 凸面光栅

中图分类号: TH744 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)01-0283-04

引 言

我国是世界水果生产大国, 但水果出口仅占总产量 2% 左右, 远远低于 9%~10% 的世界平均水平^[1], 主要限制因素是水果分级水平。水果的品质是水果分级的主要依据, 无损检测是水果品质检测技术的发展趋势。水果品质无损检测是应用一定的检测手段和分析方法对水果的品质进行无损损伤测量, 依据测量结果和评价标准对水果品质做出评价的过程。目前水果品质的无损检测一般是利用水果的电学、声学、光学特性等技术对水果品质进行检测。近年来, 大量的研究利用可见/近红外波谱信息进行水果蔬菜的内部品质、缺陷和农药含量等的瞬态无损损伤检测。但在利用测谱学探测材料的内部品质过程中, 测量的是物体小视场内的反射或透射可见近红外光谱, 其探测面非常小甚至仅为一点。成像光谱或高光谱成像是利用物体全部表面信息对其内部品质进行评估, 具有高精度预测微小细节的优点^[2], 优于测谱学分析, 近年来受到食品研究者的关注。

成像光谱技术作为一种起源于遥感领域的新型分析技术, 在获得探测目标的空间成像信息的同时获得探测目标的光谱信息, 可以同时进行成像和光谱的测量, 在地质、植被、生态环境、城市以及军事等领域, 发挥着十分巨大的作用。将成像光谱技术应用于水果品质无损检测中, 通过成像光谱数据立方可同时得到水果外部和内部品质“图谱合一”的检测

结果, 具有高精度、无损伤、无污染等优点, 国内外开展了相关研究并取得了一定的研究成果^[3-6]。基于成像光谱技术的成像光谱仪是获得成像光谱的重要仪器。成像光谱仪由前置成像光学系统和光谱仪系统组成, 光谱仪系统是成像光谱仪的关键部分, 常见的分光模式有色散棱镜、干涉滤光片、平面闪耀光栅等^[7]。凸面光栅成像光谱仪则是采用凸面光栅为分光元件的 Offner 同心分光系统, 该系统无象散、谱线弯曲小、色畸变小、结构简单, 易于实现小型化^[8]。近年来, 随着光栅制造技术的发展, 凸面光栅成像光谱仪逐渐从理论研究走向实际应用^[9, 10]。凸面光栅成像光谱仪的成像质量好、易于实现小型化特性使其尤其适合小型的成像光谱测量应用。

本文以自主研发的凸面光栅作为核心元件设计了一种用于获取水果成像光谱的小型凸面光栅成像光谱仪, 并利用凸面光栅成像光谱仪进行了富士苹果的成像光谱测量实验, 克服了传统近红外光谱检测探测面积小, 难以实现大面积瞬态检测的缺点, 这对水果品质无损检测具有重要意义。

1 小型凸面光栅成像光谱仪的设计

1.1 凸面光栅成像光谱仪的基本原理

凸面光栅成像光谱仪的前置成像系统和光谱仪系统通过狭缝有机的连结起来。如图 1 所示, 光源发出的光照射到水果表面, 经水果表面反射后进入前置光学系统, 前置系统将

收稿日期: 2011-03-15, 修订日期: 2011-07-28

基金项目: 国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)和吉林省科技支撑计划项目(20106011)资助

作者简介: 刘玉娟, 女, 1984 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: xuliuyujuan@163.com

* 通讯联系人 e-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

水果表面成像在狭缝上形成狭缝像,狭缝像经分光系统分光后在探测器上形成多波段的光谱像。狭缝作为光阑使沿狭缝方向的条带成像并经分光系统分光后在探测器上接收,通过推扫方式形成水果连续空间的数据立方。数据立方包括二维空间信息 (x, y) 和一维光谱信息 (λ) ,如图 1 所示,空间每一点经系统成像后对应的象元均能提取出一条平滑而完整的光谱曲线,通过光谱曲线分析对水果的内部成分及其含量进行判断。

凸面光栅分光系统采用基于 Offner 中继系统的同心光学结构,是成像光谱仪的核心部分,凸面光栅分光系统的性能直接决定着水果品质的测量精确度、准确度以及水果分级的水平。如图 1 所示,凸面光栅分光系统仅由两个凹球面反射镜和一个凸面光栅组成,反射镜、凸面光栅的表面均为球面且所有球面的中心在同一点,凸面光栅位于两个反射镜之间,这种同心结构具有谱线弯曲和色畸变小、成像质量好、结构简单、性能稳定、加工较易实现等优点^[8]。

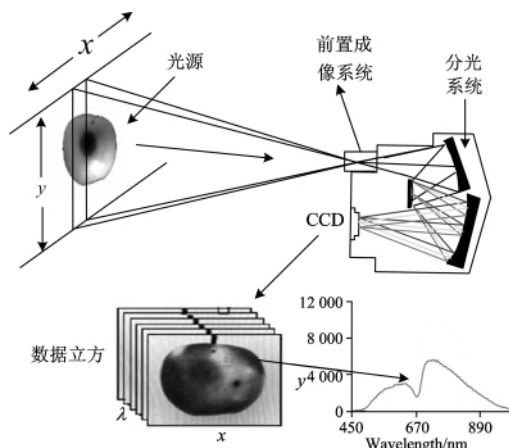


Fig 1 Schematic of the imaging spectrometer with convex grating for the inspection of fruit quality

水果的外部品质即空间信息由成像光谱仪的前置成像系统决定,成像光谱仪的前置成像系统设计必须与后端光谱仪系统孔径匹配以实现整个系统的最大光学效率,这就要求成像光谱仪前置系统在实现物方远心的同时具有较大的视场和相对孔径,折射式望远系统具有像质好、视场大、角弥散小等优点,是推扫式成像光谱仪实现其性能的较好选择之一^[10]。从成像质量、加工成本以及实现程度综合考虑,凸面光栅成像光谱仪选择折射式望远系统。

1.2 仪器指标

依据电磁波理论,水果品质检测敏感波段为可见近红外光谱区,为了在获取有用光谱信息的同时避免光谱级次重叠、提高仪器的信噪比,凸面光栅成像光谱仪的光谱范围设计为 450~800 nm。光源照射在被检测水果表面经反射后得到反射光谱,利用反射光谱可进行水果品质无损检测。

光谱分辨率是成像光谱仪性能的主要指标之一,光谱分辨率越高,物质识别精度就越高,相应的水果品质分级水平越高;与传统的成像光谱仪相比,凸面光栅成像光谱仪光谱分辨率可达几 nm。目前,有报道的用于水果品质检测的成

像光谱仪的光谱分辨率为 3.5 nm^[11]。凸面光栅成像光谱仪空间分辨率由前置望远系统决定,空间分辨率越高,水果外部品质检测越精确。

根据现有条件、凸面光栅的制造水平、成像光谱仪及水果品质检测特点,用于水果成像光谱测量的小型凸面光栅成像光谱仪的设计参数如表 1 所示。

Table 1 Parameters of imaging spectrometer with convex grating

尺寸/mm ³	<220×200×150
质量/kg	<6
光谱范围/nm	450~800
光谱分辨率	优于 2.4 nm
视场角	大于 15°×0.5°
F#	3
光栅常数/μm	6.67

1.3 光学系统

光学系统决定了仪器的性能、尺寸,是凸面光栅成像光谱仪实现小型化的关键。根据光谱范围,选择高量子效率的 CCD 探测器,其像元大小为 24 μm×24 μm,像元数为 1 004×1 004,则线色散为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta l} = 100 \text{ nm/mm} \quad (1)$$

凸面光栅成像光谱仪的光学成像满足罗兰条件,由光栅方程^[12]得

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{mR}{d} \quad (2)$$

其中 m 为衍射级次-1, d 为光栅常数, R 为光栅曲率半径,经计算得 R 为 66.7 mm。

根据衍射效率的要求,设计制作的凸面光栅的光谱范围为 300~1 000 nm,光栅常数为 6.67 μm,槽深为 150 nm,占宽比为 0.5。凸面光栅的衍射效率曲线如图 2 所示,由图可见凸面光栅在整个使用波段内的衍射效率理论上均高于 30%,使用于短焦距成像光谱仪时,完全满足仪器要求。

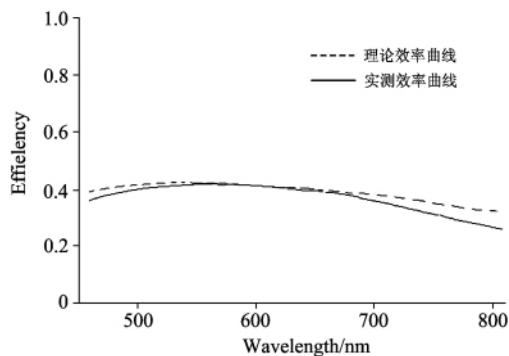


Fig 2 Efficiency of convex grating

根据指标要求,凸面光栅成像光谱仪分光系统的光学设计结构如图 3 所示,其具体参数如图 4 所示。结果表明通过光学系统的优化设计基于 Offner 同心结构的小型凸面光栅

成像光谱仪得到了较好的结果。

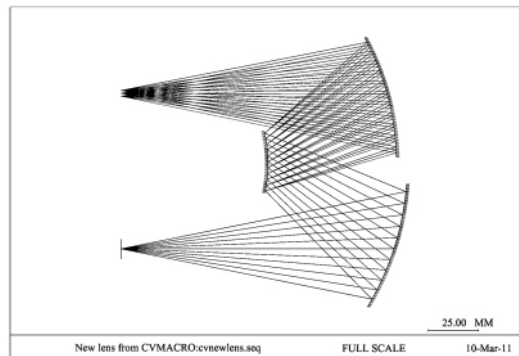


Fig 3 Optical design of the spectrometer with convex grating

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Refract Mode	Y Semi-Aperture	Non-Centered Data
Object	Sphere	Infinity	142.6780	Refract		
1	Sphere	Infinity	0.0000	Refract	72.2493	Basic Decenter
2	Sphere	-142.6600	0.0000	Refract	68.6554	
3	Sphere	Infinity	-69.3300	Refract	86.8860	
Stop	Sphere	-66.7000	0.0000	Refract	15.6570	
5	Sphere	Infinity	63.9300	Refract	17.4201	
6	Sphere	-137.2600	0.0000	Refract	63.2792	
7	Sphere	Infinity	-137.2282	Refract	66.4219	
Image	Sphere	Infinity	0.0000	Refract	38.5201	

Fig 4 Optical parameters of the imaging spectrometers with convex grating

1. 4 数据存储

小型凸面成像光谱仪光谱分辨率优于 2.4 nm，光谱范围为 450~800 nm，则光谱通道数高于 140，当扫描时间较长时其成像光谱数据大大增加，给数据的传输和存储带来很大压力，数据压缩是解决此问题的有效方法。目前，高精度的压缩存储算法较多，采用相对较为成熟的基于 JPEG2000 的无损压缩算法^[13]，进行数据压缩以提高数据传输、存储效率。为了克服软件压缩实时性差，处理速度慢、稳定性弱的缺点，设计了基于可编程逻辑器件 FPGA 和 JPEG2000 的专业压缩芯片 ADV212 的硬件压缩系统进行数据压缩存储，实现了实时、准确、高效的数据传输存储。数据压缩系统流程如图 5 所示。经过数据压缩后成像光谱仪系统的连续工作的数据率大大降低，普通 CameraLink 传输线就能满足应用要求。



Fig 5 Schematic of data compress and storage system

1. 5 结果及分析

要利用小型凸面光栅成像光谱仪对水果进行成像光谱测量，首先必须对设计的小型凸面光栅成像光谱仪进行定标。采用目前较为成熟的单色准直光法对成像光谱仪进行了光谱定标。利用定标后的成像光谱仪对标准汞灯进行成像光谱测量实验，测得的标准汞灯 400~800 nm 的 1 级衍射光谱如图 6 所示。由图可见，凸面光栅成像光谱仪可以将汞灯光谱中 577.0 和 579.1 nm 的两条谱线清晰分离且图中各条谱线亮度均匀，即在波长为 578.0 nm 处光谱分辨率为 2.1 nm，

满足光谱分辨率高于 2.4 nm 的要求。分别对小型凸面光栅成像光谱仪的谱线弯曲和色畸变进行了检测实验，测得该系统的光谱谱线弯曲为 0.1%，色畸变为 0.6%，均满足目标值。

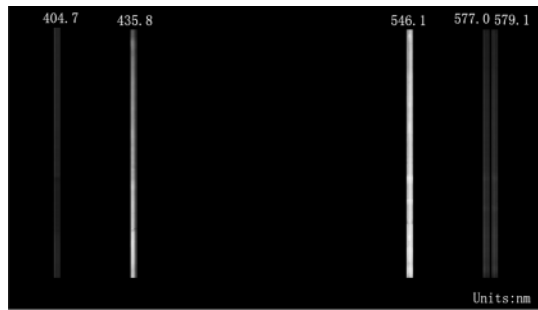


Fig 6 Spectrum of standard Hg-lamp

2 苹果的成像光谱测量

利用设计的凸面光栅成像光谱仪对富士苹果进行了成像光谱测量实验，具体步骤为如下：首先，采用太阳光作为连续光源，将富士苹果置于成像光谱仪 0.88 m 焦点处，同时使太阳光完全照射富士苹果；然后利用步进电机驱动小型成像光谱以特定的速度进行连续推扫扫描，完成对整个苹果的扫描即得到苹果的数据立方。通过苹果数据立方可以提取苹果的多光谱伪彩成像图以及苹果表面各点的反射太阳光谱曲线。如图 7 所示，可提取表面 A 点、B 点的光谱曲线。通过分析苹果的伪彩成像图(左)可以直观的得到苹果的表面图像以及微小结构，从而确定其外部品质，如由图中伪彩图可以看出 A 点和 B 点的完好无损。通过数据立方提取由各点对应的光谱曲线(右)，由光谱曲线可知：图中 A 点反射率较高而 B 点反射率明显下降。利用成像光谱进行水果的坚实度检测中位于 450~800 nm 内的特征波长为 680 nm。选取特征波长 680 nm 的数据，利用目前已较为成熟的 PCA 和 PLS 等算法，可以计算出苹果 A 点和 B 点对应的坚实度、成熟度、水分、矿物质等的含量，依据计算结果和水果分级标准，即可实现对水果品质的检测和高精度的水果分级。由于本工作旨在获取水果的成像光谱数据，具体坚实度、成熟度、水分、矿物质等含量的计算过程已经较为成熟，故不予以计算。

3 结 论

利用成像光谱仪对水果进行成像光谱测量，通过推扫方式形成水果大面积连续空间的成像光谱数据立方，同时进行高精度、无损伤、无污染的水果内外品质检测，弥补了传统测谱学进行水果品质检测时探测面积小的不足。本工作设计了一种用于水果成像光谱测量的小型凸面光栅成像光谱仪，利用设计的小型成像光谱仪进行了检测实验并对苹果进行了成像光谱测量实验。结果表明：凸面光栅成像光谱仪可以获得高精度水果成像光谱，且仪器具有体积小、重量轻的优点，对水果蔬菜的品质检测和成像光谱技术的推广具有重要意义。

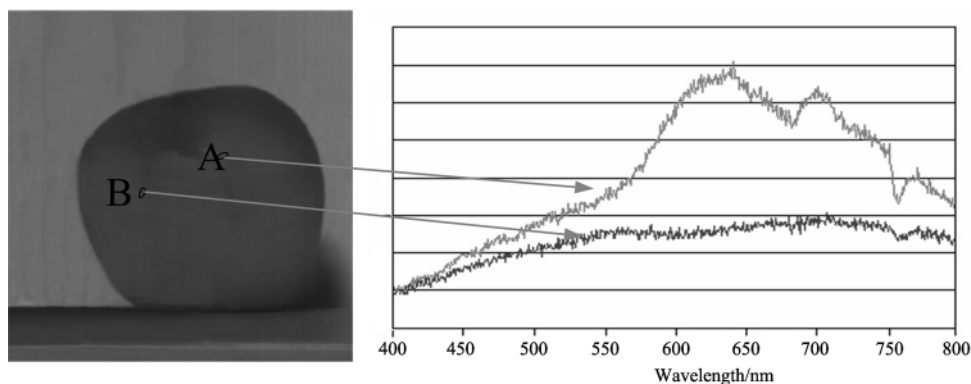


Fig 7 False image of the apple(left) and spectra of point A and B(right)

References

- [1] National Bureau of Statistics of China(中华人民共和国国家统计局). China Statistical Yearbook 2007(2007 中国统计年鉴), 2007.
- [2] Sivakumar Servakaranpalayam S. Potential Applications of Hyperspectral Imaging for the Determination of Total Soluble Solids, Water Content and Firmness in Mango, Canada, 2006.
- [3] Alan M, Lefcote, Moon S Kim. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50: 135.
- [4] Masateru Nagata, Jasper G Tallada, Taiichi Kobayashi, et al. Paper Number:043033. 2004 ASAE Annual International Meeting, Ontario, Canada, 2004, 1-4 August.
- [5] Masateru Nagata, Jasper G Tallada, Paper Number: 053131. 2005 ASAE Annual International Meeting, Tampa, Florida, 2005, 17-20 July.
- [6] Lu R. Postharvest Biology and Technology, 2004, 31(1): 147.
- [7] Lobb D R. Proc. SPIE, 1997, 3118: 339.
- [8] Reininger F M, Coradini A, Capacioni F. Proc. SPIE, 1996, 2819: 66.
- [9] Carle M Pieters, Joseph Boardman, Bonnie Buratti, Current Science, 2009, 96(4): 500.
- [10] Fisher J, Welch W C. Proc. SPIE, 2006, 6206: 62062.
- [11] Peng Yankun, Lu Renfu. Biology and Technology, 2007, 8753: 1.
- [12] WU Guo-an(吴国安). Design of Spectrometer(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1978.
- [13] Giovanni Motta, Francesco Rizzo, James A Storer. Hyperspectral Data Compression, Springer Science Business Media, USA 2006.

Small Imaging Spectrometer for the Inspection of Fruit Quality

LIU Yu-juan^{1,2}, TANG Yu-guo^{1*}, CUI Ji-cheng^{1,2}, Bayanheshig¹

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Imaging spectrometer can acquire spatial and spectral information of the target at the same time, achieve high-precision, non-destructive, non-contamination and large area instantaneous inspection of the fruit. In order to get the imaging spectrum of the fruit, compact imaging spectrometer with convex grating produced by self was designed, it has the advantages of good performance, small volume and low weight, its resolution at 578 nm is 2.1 nm, and spectral line bend and chromatic distortion are both smaller than 0.6%. Laboratory test of the imaging spectrometer and the experiment of getting the imaging spectrum of apple were done, and the result shows that the imaging spectrometer satisfies the design requirement and can acquire the imaging spectrum of apple rapidly with high precision for inspection of fruit quality.

Keywords Imaging spectrometer; Fruit quality; Non-destructive inspection; Convex grating

* Corresponding author

(Received Mar. 15, 2011; accepted Jul. 28, 2011)