



水果品质的多光谱检测方法与系统研究

郑一鸣, 魏 扬, 李 琨, 陈晓西*

(电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 为无损获取检测样品的多光谱图像, 研究了一种利用液晶可调谐滤光片(LCTF)获取多光谱图像的方法。多级 LCTF 以 Lyot 形式级联可在很宽的光谱波段内电控调谐, 通过改变所施加电压的大小, 实现对滤光片的动态调制, 获得高精度的窄带光谱输出。与传统的使用多光谱仪获取多光谱图像相比, 该方法具有控制简单、调制电压小、可快速连续调制等优点。该文采用 1/4 波片法测量一组波片的电压-相位延迟特性, 选取合适的波片组成三级滤光片, 实现对宽带光谱的窄带滤光, 并基于这种方法构建了多光谱成像系统, 用于实现对水果品质的无损多光谱检测。

关键词: 液晶可调谐滤光片; 多光谱成像; 相位延迟量测量; 水果品质

中图分类号: O433.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230281

Study on Multispectral Detection Method and System for Fruit Quality

ZHENG Yiming, WEI Yang, LI Kun, CHEN Xiaoxi*

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to obtain the multispectral image of the non-destructive test sample, a method of obtaining the multispectral image by using the liquid crystal tunable filter (LCTF) is studied. LCTF has the functions of light modulation, deflection and filtering. The cascade of multi-stage Lyot wave plates can be electronically tuned in a wide spectral band. By changing the applied voltage, the dynamic modulation of the filter can be realized to obtain high-precision narrow-band spectral output. Compared with the traditional multi-spectral image obtained by using the multi-spectral spectrometer, LCTF has the advantages of simple control, low modulation voltage, fast continuous modulation and so on. In this paper, the voltage phase delay characteristics of a group of wave plates are measured by the quarter-wave retarder method, and the appropriate wave plates are selected to form a triple filter to realize the narrow-band filtering of the broadband spectrum. A multispectral imaging system is obtained by this method to realize non-destructive testing for fruit quality.

Key words: liquid crystal tunable filter; multi-spectral imaging; phase delay measuring; fruit quality

传统的基于机器视觉检测技术的水果无损检测方法只能对样品部分表面特征进行检测, 并不能实现对轻微损伤及其内部品质的检测^[1]。近年来, 多光谱成像技术快速发展, 已广泛应用于航空航天遥感、生物医药、物质分析、大气探测、色彩复制和军事应用等领域^[2-3]。如今利用多光谱成像技术对各类农作物外部损伤、腐烂、疤痕等进行检测的方法研究不断增多, 而经实践可行的方法也得到了广泛的应用^[4-5]。

多光谱成像技术的分光方式将影响整个系统

的成像质量、结构、体积以及重量等^[6]。可调滤光片是一种新型分光技术, 可通过声光调控、温控、机械式、电光等方法实现对滤光参数的调谐^[7]。其中利用液晶电光效应来实现可调谐的液晶可调谐滤光片(LCTF)可以通过选择样本的特征波段获得较好的检测效果^[8-9], 具有操作简易、器件轻薄、可集成等优点^[10-12]。

本文通过对制得的 LCTF 进行性能测试与选取, 搭建了基于 LCTF 的简易多光谱成像系统, 并以圣女果为样品进行光谱成像与分析, 研究相

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2024-01-08

基金项目: 四川省科技计划应用基础研究项目(2020YJ0327)。

作者简介: 郑一鸣(2002-), 男, 本科生, 光源与照明专业。

*通信作者: 陈晓西(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事液晶光电子器件和计算成像等方面的研究。E-mail:

chenxiaoxi@uestc.edu.cn

关多光谱无损检测方法^[13]。

1 基于 LCTF 的多光谱成像系统简介

基于 LCTF 的多光谱成像系统如图 1 所示，该系统包括背光系统、实验水果样品及多光谱成像装置，其中，多光谱成像装置由成像镜头、液晶可调滤光片与图像传感器构成。系统通过控制可调滤光片上的电压使滤光片透过不同中心波长光，实现对样品二维图像的滤光效果。最终，图像传感器采集得到样品的一系列不同中心波长光的多光谱成像图像。

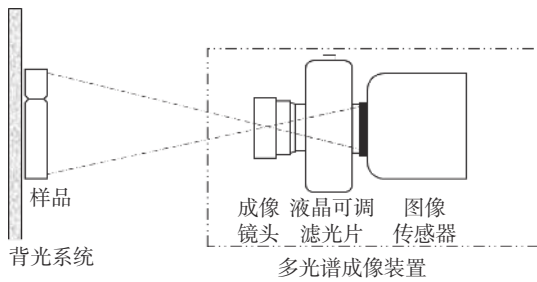


图 1 多光谱成像系统示意图

系统的可调滤光片由多个 Lyot 型液晶滤光片级联构成，如图 2(a)所示。单级 Lyot 滤波片由前后偏振片及液晶波片组成，偏振片的透光轴平行并和液晶波片的光轴成 45° 夹角，如图 2(b)所示，其透过率光谱分布取决于液晶盒的相位延迟量。每个液晶盒上施加不同的电压 v_1 、 v_2 和 v_3 ，实现具有不同光谱分布和中心波长性能的窄带滤光效果^[13]，改变电压就可改变窄带滤光的中心波长。

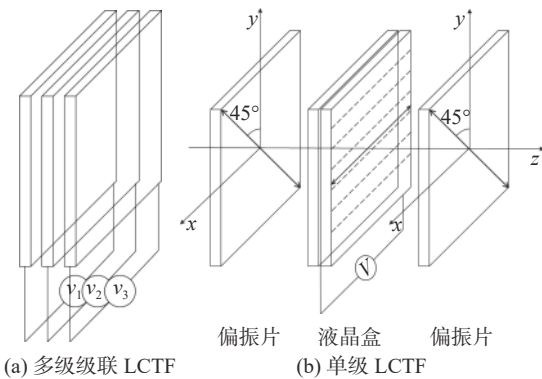


图 2 多级级联 LCTF 及单级 LCTF 结构示意图

2 液晶可调谐滤光片的设计和优化

基于 LCTF 的可调谐性，将不同的 LCTF 进行级联可实现窄带滤光效果。实验多光谱成像系统的性能取决于 LCTF 的滤光参数，因此，设计

和优化 LCTF 的滤光参数是关键。为了优化级联 LCTF，需要先对各级 LCTF 中液晶波片的相位延迟进行测试，根据测试数据对单级 LCTF 的滤光性能进行仿真，再由仿真数据获得对应级联滤光片的驱动条件。

2.1 液晶可调谐波片的性能测试与选取

本文采用了 1/4 波片法测量液晶波片的电压-相位延迟变化^[14]。三级级联滤光片中的 3 块液晶波片参数为：波片一的双折射率差 $\Delta n_1=0.20$ ，液晶盒厚 $d_1=4 \mu\text{m}$ ；波片二的 $\Delta n_2=0.26$ ， $d_2=9 \mu\text{m}$ ；波片三的 $\Delta n_3=0.25$ ， $d_3=12 \mu\text{m}$ 。3 块液晶波片的相位延迟-电压的性能曲线如图 3 所示，测试采用的激光波长 $\lambda=532 \text{ nm}$ ，3 块波片的相位延迟可调范围分别为 $0.10 \lambda \sim 1.38 \lambda$ 、 $0.33 \lambda \sim 4.22 \lambda$ 、 $0.09 \lambda \sim 4.95 \lambda$ 。

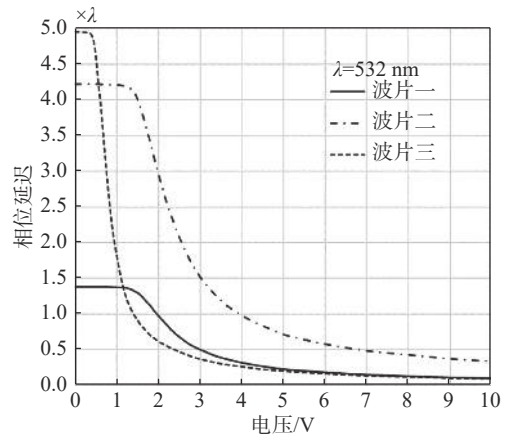


图 3 三块波片的电压-相位延迟特性曲线图

2.2 液晶可调谐滤光片的级联仿真

根据已有的 LCTF 电压-相位延迟特性曲线，对级联 LCTF 的滤光效果进行仿真，并设计多光谱成像的各光谱波段。仿真结果表明三级级联 LCTF 在可见光波段内的滤光带宽为 40 nm，因此在可见光波段中选择了一组对应中心波长间距为 40 nm 的波段，不同波段对应的中心波长和波片数据如表 1 所示。

表 1 三级级联 LCTF 的中心波长及对应波片的相位延迟

波片一	相位延迟		中心波长/nm
	波片二	波片三	
0.761 λ	1.516 λ	2.994 λ	400
0.822 λ	1.700 λ	3.322 λ	444
0.911 λ	1.817 λ	3.667 λ	487
0.977 λ	1.939 λ	3.985 λ	527
1.044 λ	2.113 λ	4.261 λ	565
1.122 λ	2.222 λ	4.594 λ	607
1.217 λ	2.389 λ	4.800 λ	638

注： λ 为测试采用的激光波长。

2.3 液晶可调谐滤光片的级联测量

根据仿真结果, 对级联 LCTF 实际滤光效果进行测量。测量方法如下: 调整级联 LCTF 中各单级 LCTF 两端电压, 使用光谱仪测量相应电压下的透射率光谱曲线, 进而得到级联 LCTF 在不同电压下所对应的中心波长与带宽, 测试结果如表 2 所示。

表 2 三级级联 LCTF 的实际滤光测试结果

两端电压/V			中心波长/ nm	带宽/ nm
波片一	波片二	波片三		
4.7	6.0	1.5	452.3	45
4.5	5.7	1.4	468.4	28
4.2	5.4	1.3	488.4	33
4.0	5.2	1.2	527.2	37
3.8	5.0	1.1	567.2	40
3.6	4.8	1.0	601.1	48
3.3	4.6	0.9	631.0	50

测试结果表明, 该系统可实现在不同中心波长的窄带滤光效果。实际滤光中心波长为 452.3 nm 与 468.4 nm 的两个波段, 与对应的仿真值 400.0 nm 和 444.0 nm 相差较大, 但在窄带情况下, 这两个波段仍可以作为多光谱图像的有效波段。最终设计和选取在 452.3~631.0 nm 波长范围内的可调滤光, 包含 7 个不同波段。

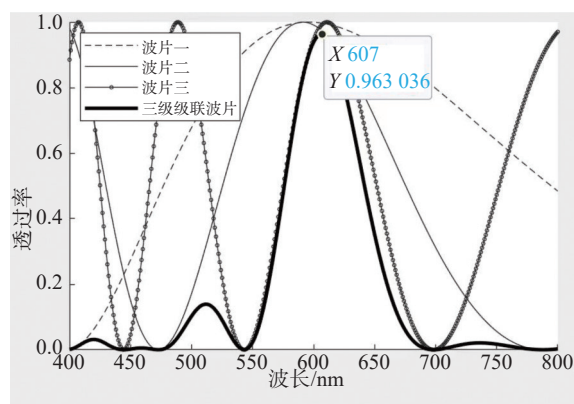
三级级联 LCTF 的实际滤光测量结果表明, LCTF 的滤光中心透过率与仿真时相比较低。仿真光谱曲线如图 4(a)所示, 其中心波长为 607.0 nm, 中心透过率为 0.96; 实际测量光谱曲线如图 4(b)所示, 其中心波长为 601.1 nm, 中心透过率为 0.63, 考虑自然光入射, 其透过率会小于 0.31。在实验中, 通过增加光源亮度、调节光源以及调整曝光时间, 可以有效降低这种影响。

3 基于多光谱系统的水果样品检测

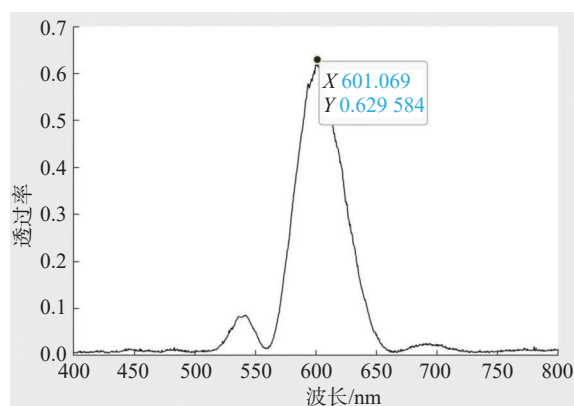
3.1 实验装置

实验搭建的简易多光谱成像装置如图 5 所示。单级 LCTF 采用反平行取向液晶盒与偏振片叠加, 液晶盒采用前文选取的波片一、波片二和波片三, 并将相应的 LCTF 级联; CMOS 图像传感器采用大恒光电 HD-G230M-U3 数字相机, 分辨率为 1920×1200, 成像镜头采用 RICON 的 FL-CC0814A-2M 镜头, 焦距为 8 mm, 光圈范围为 F1.4~F16。该装置可以采集 7 个不同波段、带宽

为 40 nm 的多光谱图像。实验以圣女果为研究对象。共有 15 个圣女果样品, 其中有 10 个发生变质, 5 个为正常样品。



(a) 仿真光谱曲线



(b) 实际测量光谱曲线

图 4 中心波长在 600 nm 左右的仿真及实际测量光谱曲线图

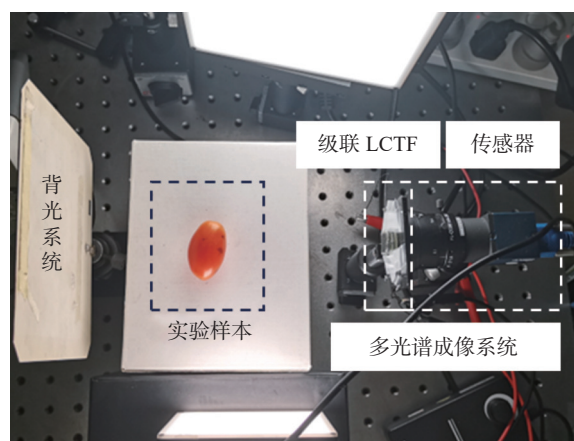


图 5 多光谱成像系统实物图

3.2 检测方法与结果分析

由于在实验光照条件下, 圣女果表面受光效果不均, 多光谱圣女果图像在不同区域光谱曲线

变化差异很大,影响到检测结果。因此在圣女果表面不同光照区域选取多个不同的感兴趣区域(region of interest, ROI)作为光谱特征区域,分别计算每个 ROI 内灰度值的均值 G , 作为该 ROI 的特征谱向量^[15]。本方法中对每一组多光谱图像均选取超过 10 个 ROI, 其中包含变质区域与正常区域。为进一步提高检测结果的准确性,测量一组未加入实验样本的白屏的多光谱图像,计算出相应 ROI 的平均灰度值 G_1 。

在不同区域不同波段下的相对灰度值 $G'(\lambda)$ 为:

$$G'(\lambda) = G(\lambda)/G_1(\lambda) \quad (1)$$

该相对灰度值可作为对应 ROI 的特征光谱曲线。

某一圣女果样本在不同波段下的整体图像如图 6 所示,在图像中选取多个不同的 ROI 进行分析。所选取的各 ROI 如图 7 所示,该样本共选取了 14 个检测区域,其中标注 1~5 号的区域为变质区域。该样本各 ROI 的相对灰度值光谱曲线如图 8 所示。

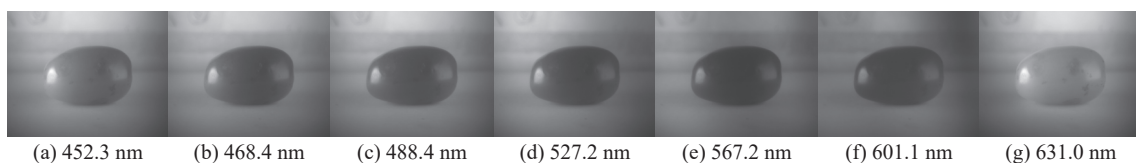


图 6 某一圣女果样本各波段的光谱图像

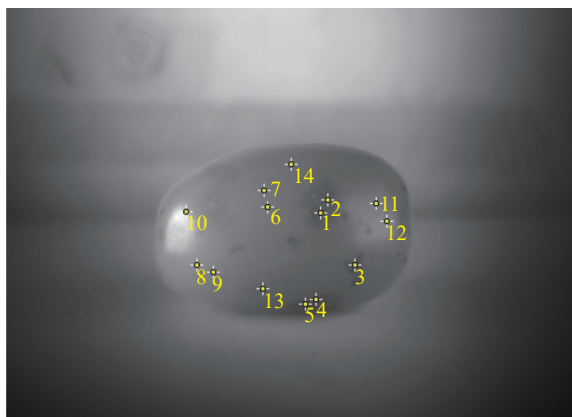


图 7 某一圣女果样本选取的不同检测区域

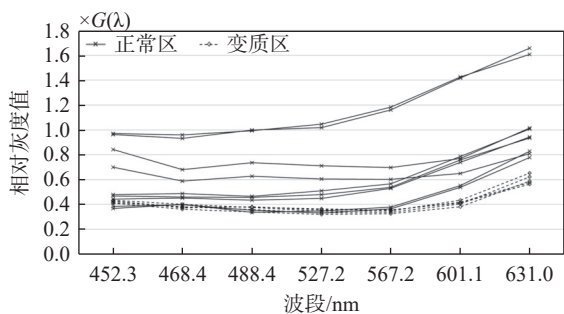


图 8 某一圣女果样本各 ROI 的相对灰度值光谱曲线图

从图 8 可以看出同一样本中不同变质区域的光谱曲线高度重合,而正常区域的光谱曲线不尽相同,但都与变质区域存在差异。通过对不同圣女果样本的进一步分析,发现这一规律适用于每一份样本,并且不同样本的变质区域的光谱曲线仍然具有很强的一致性,因此认为变质区域和正常区域的光谱曲线具有以下规律:

1) 变质区域光谱曲线在 452.3 nm 波段的相对灰度值在 0.4 左右,同时在 452.3~567.4 nm 的变化趋势非常平缓;

2) 正常区域光谱曲线在 567.4~631.0 nm 波段的相对灰度值变化十分明显,与变质区域相比,其在 567.4 nm 和 631.0 nm 波段的相对灰度值普遍具有较大的差值;

3) 可以用四次函数 $G'(\lambda) = a\lambda^4 - b\lambda^3 + c\lambda^2 - d\lambda + e$ 来描述变质区域的光谱曲线,其中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 均大于 0,且 $a \approx 0.001$, $e \approx 0.5$ 。通过四次函数可以较好地拟合出变质区域的光谱曲线,而正常区域则不能用此方法来描述。实际测量时,只需要选定某一区域,测量出不同波段的灰度值,代入函数验证即可判断该区域是否变质。

圣女果样本在不同波段的图像具有不同的灰度值差异,本文采用了一种通过函数表征光谱曲线的方法,从而反映出变质区域与正常区域的不同特征。故测量时,只需要选定某一区域,测量出不同波段的灰度值,代入函数验证即可判断该区域是否变质。在实际应用中进一步拓展,可以达到对于水果品质的无损多光谱检测目的。

4 结束语

本文利用 LCTF 构建了一种简易多光谱成像系统,通过该系统能够获取 7 个不同波段的光谱图像。经初步实验认为,利用该系统对圣女果样本

(下转第 38 页)