

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.034

农畜产品安全无损检测扫描式拉曼光谱成像系统设计

翟晨¹ 彭彦昆¹ Chao Kuanglin² 赵娟¹ 李永玉¹ 李延¹

(1. 中国农业大学国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083;

2. 美国农业部环境微生物与食品安全实验室, 马里兰 20705)

摘要: 构建了用于农畜产品安全检测的扫描式拉曼光谱成像检测系统,对其硬件和软件分别进行了搭建和设计,实现了拉曼光谱和图像同步获取。根据检测的实际需求和精度要求确定了检测系统中拉曼成像光谱仪、CCD相机、镜头、激光光源、移动平移台等主要元器件。开发了拉曼光谱成像检测系统实时检测与分析软件。软件以LabView为主开发环境,实现了对CCD相机、激光光源等硬件的控制,利用LabView与Matlab混合编程,完成数据的提取、分析计算与结果保存,通过LabView与ENVI的混合编程,完成扫描线图像的实时合成和显示。对系统进行了安装和性能测试,光谱校正确定了CCD相机探测的拉曼光谱范围为 $-679.3 \sim 2885.7 \text{ cm}^{-1}$,空间校正确定了系统实际的空间分辨率为 0.22 mm/像素 。构建的拉曼光谱成像检测系统可快速、无损获取样品拉曼光谱和图像信息。

关键词: 农畜产品; 无损检测; 拉曼光谱成像系统; 设计

中图分类号: O657.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)12-0279-06

Design of Line-scan Raman Imaging System for Nondestructive Detection of Agricultural and Livestock Products Safety

Zhai Chen¹ Peng Yankun¹ Chao Kuanglin² Zhao Juan¹ Li Yongyu¹ Li Yan¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Environmental Microbiology and Food Safety, US Department of Agriculture, MD 20705, USA)

Abstract: The scanning Raman imaging detection system was constructed, and the Raman spectrum and Raman image can be acquired. In accordance with the actual needs and the detection accuracy, the Raman imaging spectrometer, CCD cameras, lenses, laser light, mobile translation stage and other major components were selected. The real-time detection and analysis software of the Raman imaging detection system was developed by using LabView programming. The detection software interface was designed by applying modular and integrated design ideas to the LabView-based software development environment. By using the software, the CCD camera, laser light source and mobile translation stage controls, parameter settings and hardware detection state monitoring can be achieved, real-time collection and display of synthetic Raman image of test sample and Raman spectral curve dynamic display can also be completed. Data acquisition, analysis and calculation results saving were completed by using Matlab algorithms in LabView. The image synthesis and real-time display were completed using ENVI programming in LabView. One-button operation design was used for the software and it had the advantages of simple interface, easy operation and software portability. By combining with the software, the hardware detection system can totally meet the requirement of real-time analysis and application. Then, the system was installed and its performance was tested. The corrected spectral CCD camera can detect the Raman spectral range of $-679.3 \sim 2885.7 \text{ cm}^{-1}$. The system ensured the actual spatial resolution was 0.22 mm/pixel via space calibration, stability of test performed well, and Raman images acquisition can be achieved.

Key words: agricultural and livestock products; nondestructive detection; Raman imaging system; design

收稿日期: 2016-10-18 修回日期: 2016-11-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400905)

作者简介: 翟晨(1988—),女,博士生,主要从事农畜产品品质安全检测研究,E-mail: zhaichenlw@163.com

通信作者: 彭彦昆(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事农畜产品品质安全检测技术及装备研究,E-mail: ypeng@cau.edu.cn

引言

拉曼光谱分析法是一种通过对入射光频率改变变量的测量分析分子振动频率的一种手段^[1-2]。在国内外众多的拉曼光谱检测仪器中,多数是利用光纤技术,引入了拉曼光纤探头^[3-4]。激光光源经过透镜聚焦后进入激发光纤,经激发光纤到达接近样品的探头部分,与样品作用后产生可测量的拉曼散射信号,再经拉曼探头收集拉曼散射光,通过采集光纤将信号传到检测器得到拉曼光谱^[5-6]。但该方法一次获取的样品拉曼信息是单一的,不能包含样品表面的更多或全部信息,尤其对于成分含量不均匀的样品,将会对检测结果造成影响,不能实现准确的测量。高光谱成像检测技术可解决样品不均匀的问题,近几年在农畜产品检测中应用广泛^[7-9]。拉曼光谱成像技术结合拉曼光谱和高光谱成像技术^[10],可以将简单的单点分析方式拓展到对一定范围内的样品进行综合分析,在不同空间位置揭示样品中主要的化学成分以及各成分的分布,给出样品中颗粒的尺寸和数目及表面物理化学性质等更多信息^[11]。

但是目前可实现拉曼光谱成像检测的仪器很少,主要的拉曼成像技术应用还是依托于显微共振拉曼技术^[12-13]和逐点扫描拉曼技术^[14],这些技术需要样品放在特定的位置处,需要高水平的仪器操作能力,同时要求必须具备高性能的计算机,满足数据获取的要求,所以这些技术大多数应用在生物学、医学等领域^[15-16]。

为了获取样品任一点的拉曼光谱信息,实现对不均匀样品的测量,本文构建能够用于实时线扫描的拉曼成像检测系统,该系统可无损检测蔬菜、水果、畜肉、粉状食品等的品质安全参数,并以面粉中过氧化苯甲酰为检测物,对系统的准确性和稳定性进行测试。

1 系统硬件设计

1.1 系统工作原理

在普通的激光拉曼光谱检测中,为获得更多的信息,必须采集更多点的光谱,从而导致采集时间的延长。为了解决这一问题,采用线扫描成像方式进行信息测量,即利用一组激光扫描装置使光斑沿 X 方向以线状形式聚焦在样品表面,这个线状光斑成像在光谱仪的入射狭缝上,从而整个线状光斑范围内样品点上的拉曼散射光成像在 CCD 的不同像元上,再通过样品沿 Y 方向的移动就可以获得一定尺寸样品的拉曼图像。

1.2 系统硬件构成

系统硬件结构示意图如图 1 所示,由光源模块、光谱采集模块、控制模块和载物装置模块等组成。利用光谱检测技术对样品的整个表面进行二维激光线扫描,并将经分束滤光片传递的信号光处理转换为电信号,从而得到整个样品的拉曼图谱信息,根据该图谱信息可以分析判断样品中所含成分的信息。

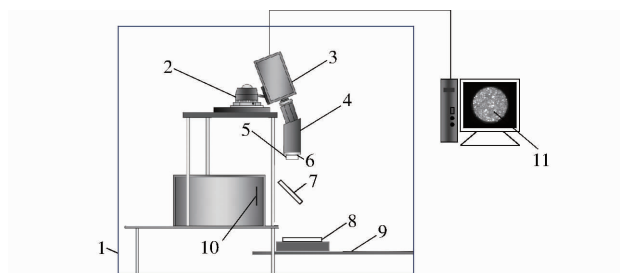


图 1 硬件系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of hardware system

1. 遮光罩 2. 圆形定位卡座 3. CCD 相机 4. 拉曼光谱仪
5. 镜头 6. 高通滤光片 7. 分光滤光片 8. 样品 9. 平移台
10. 785 nm 滤光片 11. 计算机

1.2.1 光源模块

光源模块的核心元件是激光器。激光源波长稳定性是影响拉曼信号的关键^[17]。激光器选择时应尽量避免荧光的干扰,同时又要保证拉曼信号不会超出 CCD 检测器的响应范围。本研究选择定制的半导体激光光源,由 9 个点光源模块、9 个光纤收集产生的激光进行融合后,形成一个高强度的激光束,激发波长为 785 nm。

1.2.2 光谱采集模块

(1) 拉曼光谱仪

拉曼光谱仪可阻挡多种散光进入探测器,与此同时将拉曼散射光入射探测器内,分散成各个频率,以便更好地进行实际探测。本系统选用的棱镜-光栅-棱镜拉曼成像摄谱仪 (ImSpector R10E, Specim, Oulu, Finland),其狭缝宽度 $30\ \mu\text{m}$,长度 $14.3\ \text{mm}$,光谱范围为 $770\sim 980\ \text{nm}$,成像尺寸(光谱 \times 空间)为 $13\ \times 13\ \text{mm}$,光谱分辨率 $0.3\ \text{nm}$ ($\approx 10\ \text{cm}^{-1}$),光谱仪的镜头接口为标准 C 口。用于从扫描线光分散成不同波长的光,然后分散的光被投影到区域检测器,产生一个二维空间光谱图像:一维表示空间,一维表示光谱。

(2) CCD 相机

CCD 相机的主要功能是用来接收检测物表面经光谱仪散射、汇聚后形成的图像信号,该信号需要 CCD 相机进行采集并进行 A/D 转换,最后以数字形式将电信号输入至计算机显示和存储。本系统选择 16 bit 背照式制冷 CCD 相机 (iKon - M934, Andor

Technology, SouthWindsor, CT, USA) 来收集拉曼图像数据, CCD 的像素区域阵列为 $1\ 024$ 像素 \times $1\ 024$ 像素, 像素尺寸为 $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$, 芯片有效面积为 $13.3\ \text{mm} \times 13.3\ \text{mm}$, 量子效率在 $800\ \text{nm}$ 处大于 90% , 在 $1\ 000\ \text{nm}$ 处大约为 45% 。在图像采集期间, 为降低暗电流和噪声, 增大检测器的动态范围, 提高系统的灵敏度, 延长曝光时间, CCD 采用半导体制冷 (TE) 对检测器进行制冷, 检测温度冷却至 -65°C 。相机通过 USB 电缆与计算机进行数据传输。

(3) 镜头

不同焦距的镜头在同样的条件下获取的目标物大小不一, 因此实际中需要根据被检测对象的大小、检测的距离来选择合适的镜头焦距。本研究选择的镜头光的传输波段为 $400 \sim 1\ 000\ \text{nm}$, 接口为标准的 C 口, 与光谱仪相匹配, 焦距为 $23\ \text{mm}$ 。

1.2.3 控制模块

控制模块主要由控制器组成, 用于控制三维平移台中步进电动机的工作。3 个控制器分别控制 X、Y、Z 方向的步进电动机, 可以实现相互独立的控制。每个控制器内置电源、步进电动机驱动器等部分。内置电源可以为步进电动机提供稳定的电压、电流, 从而保证电动机正常工作。

1.2.4 载物装置模块

移动平移台的主要目的是为了在系统线扫描采集过程中, 带动样品进行移动。在实际应用中, 平移台的选型需要匹配光谱仪、CCD 相机采集的空间分辨率, 以保证每个样品采集的线图像最后能合成为一幅完整的图像。选择平移台行程为 $45\ \text{cm}$, 位移分辨率为 $1.587\ 5\ \mu\text{m}/\text{步}$ 。平移台与控制器通过 RS232 口连接, 控制器通过 RS232 - USB 转接与计算机相连, 可通过计算机控制平移台的移动距离及扫描步长等参数。

2 软件开发设计

2.1 开发工具

软件系统开发利用 LabView 与 Matlab、ENVI 混合编程, LabView 设计用户图像界面, 负责数据采集, Matlab 在后台提供大型算法供 LabView 调用, ENVI 实现图像的合成和实时显示。主程序设计采用一键式设计思路, 将信号检测、运动控制、图像采集、数据处理等过程进行封装, 在实际使用中, 只需要点击检测按钮, 就可以获得需要的结果。

2.2 功能模块的实现

2.2.1 硬件参数设置模块

(1) 系统工作状态监控

控制硬件主要包括 CCD 相机、激光光源和移动

平移台。除了需实现对硬件的运动控制外, 在实际的应用中还需对各个硬件的工作状态进行实时监测, 确保仪器处于最佳的工作状态。硬件工作状态监测包括: 相机连接状态、相机制冷器状态、相机准备状态、相机工作状态及光源开关状态。只有这些状态均正常, 系统才开始正常运行。

(2) 相机采集参数设置

在开始工作之前, 需要先根据实际需要的数据类型对检测装置主要硬件 CCD 相机进行工作参数的设定。CCD 相机需要设定的参数大多为相机的内部性能参数, 对此可以通过 CCD 相机自带的软件 SOLIS 进行设定。其中, 对于采集模式和触发模式等可以根据实际需要设定为固定模式并进行保存, 无需每次工作前再进行二次设定。而曝光时间、binning 值、制冷温度这 3 个主要工作参数, 在实际工作中需要随时进行修改, 因此软件开发硬件参数功能模块中设计了可随时监测和更改这 3 个参数的功能。

(3) 运动控制设置

运动参数设置部分主要是对平移台的工作控制, 包括平移台的运动模式、运动速度、运动步长、运动距离等。在软件开发中, 运动模式和运动速度可直接在后台程序中进行默认设定, 而运动步长和运动距离, 用户可以根据样品的实际情况在操作界面进行设置和修改。该部分的运动模式设置为连续自动返回模式, 即运动平台在完成设定的移动距离后将以连续的快速模式返回原点, 运动速度设置为 $6\ 000\ \text{步}/\text{s}$ 。

2.2.2 数据采集合成模块

拉曼光谱成像系统采集的样品图像, 实际上是一个由样品的平面空间和光谱维度共同构成的数据立方体。本系统采用推扫式的图像数据采集方式, 借助于样品输送装置的移动实现样品表面扫描线图像的逐个获取, 然后将这些扫描线图像进行合成, 得到完整的样品拉曼光谱图像。线扫描的采集及合成过程如图 2 所示, 其中 x 代表样品移动的方向, y 代表扫描线的空间位置, λ 表示波长。线扫描图像合成如图 2a 所示, 光谱成像系统是利用一个入射狭缝, 在垂直于狭缝方向使得样品与狭缝实现一维相对运动, 可以获取样品表面一条线的图像信息, 通过 x 方向移动, 对物体表面逐行扫描。图 2b 为按 BIP (波段按像元交叉格式) 格式逐次存储每一条扫描线上每一个像元的所有波段信息。随着相机逐步采集每条扫描线的信息, 扫描线的拉曼图像依次逐条累加合成; 当相机完成采集任务时, 后台合成程序同时完成对样品拉曼图像的合成, 图 2c 为每一个波段

下对应的所有扫描线的合成图像,因此 N 条扫描线的图像数据合成后将是一个三维立方体数据块,即“hypercube”图像^[18]。对应到 CCD 探测器的靶面

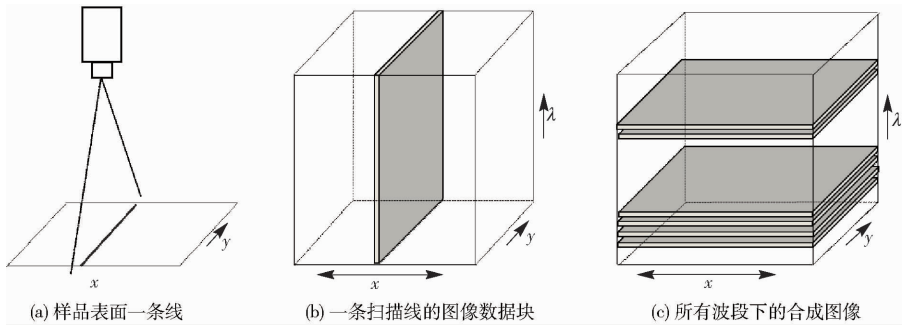


图2 图像合成过程示意图

Fig. 2 Diagrams of image synthesis process

2.2.3 数据运算模块

数据运算模块在软件开发中主要借助 Matlab 来进行数据分析和结果计算。这一部分融合了 LabView 与 Matlab 的混合编程,通过 LabView 来控制 CCD 相机进行图像数据的实时获取,调用 Matlab 的 .m 文件进行数据的实时分析。数据运算模块主要包括 2 部分的运算:根据提取的拉曼信息定性识别待检测物质;根据实验建立定量模型来预测待检测物质的含量。

(1) 定性判别

软件数据运算的定性分析是通过判断物质的特征峰是否存在来定性。假设采集的图像尺寸为 $512 \times 160 \times 1024$ (空间像素为 512,扫描线长度为 160,波段数为 1024),则每一条扫描线上有 512 个像素点,每一个像素点有 1024 个波段的信息,通过提取每个点的拉曼光谱波段信息来进行拉曼峰的寻找。通过调用 Matlab 分析程序来对每一点的拉曼光谱信息进行分析,找到代表该物质的多个特征峰,通过多个特征峰是否同时存在来判定是否含有该检测物质。

(2) 定量分析

数据运算模块的定量分析部分,则是通过调用在软件设计中定量预测模型进行分析计算。每条扫描线上所有的检测点都代入预测模型进行含量计算,而所有检测点的含量平均值则作为该条扫描线上的含量。最终得到的样品含量则是所有扫描线的含量平均值。

2.3 软件界面

利用 LabView 2010 语言完成软件界面设计、图像采集、显示、信号检测、二维平台控制及数据管理等模块,通过 LabView 2010 调用相机与运动控制平台的动态链接库完成样品的拉曼光谱图像实时扫描与采集。在 LabView 中使用 Matlab 数据处理脚

上,一个坐标轴代表扫描线图像的空间轴,另一个坐标轴代表光谱轴。图像上任意点 (x, y) 的灰度,代表该点在对应扫描线 x 点、波长 y 处的拉曼强度。

本,建立合适的光谱图像分析算法,完成对采集数据的处理分析,实时显示预测结果,对样品品质给出判定结果。软件界面外观与常见操作系统类似,如图 3 所示。

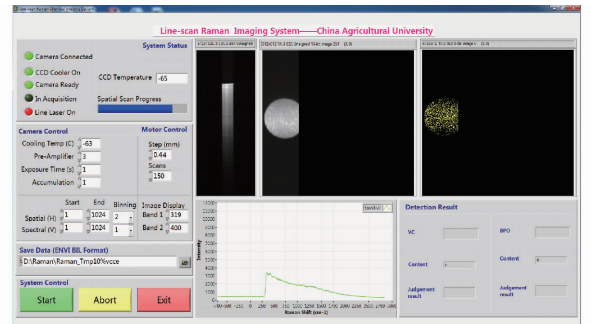


图3 用于数据采集和系统控制的 LabView 软件的界面

Fig. 3 Interface of LabView software for data acquisition and system control

3 系统校正

3.1 光谱校正

光谱校正的主要目的是确定系统的波数检测范围,即确定 CCD 探测器上的检测像素点与拉曼波数之间的对应关系,把像素坐标转换成频移坐标^[19]。为了确定该对应关系,选择拉曼谱峰特征明显的化学物质——萘,作为光谱校正的对比物,通过该物质特征峰的确定波数与本系统 CCD 相机的像素点之间建立二次拟合方程^[20]。图 4 为利用搭建的拉曼成像系统测得的标品萘与 CCD 像素点对应的拉曼光谱曲线,从拉曼谱图上可以看到萘有多个比较明显的特征峰。利用图中标出的 7 个特征峰对应的实际拉曼频移量与对应的像素点位置建立二次多项式拟合。通过分析,相机的像素点坐标与实际的拉曼频移之间存在良好的拟合关系,决定系数 R^2 为 1。系统校正后 CCD 相机能探测到的拉曼光谱范围为 $-679.3 \sim 2885.7 \text{ cm}^{-1}$ 。

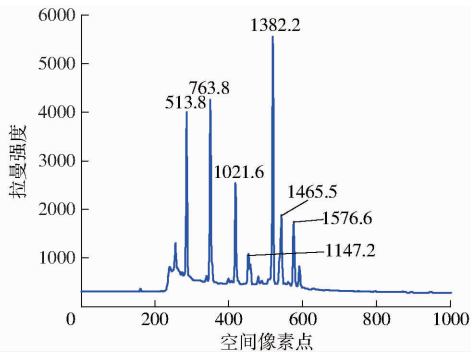


图 4 拉曼频移校正: 萘的光谱曲线

Fig. 4 Spectral calibration for Raman chemical imaging system; Raman spectrum of naphthalene

3.2 空间校正

空间校正的主要目的是确定系统实际的空间分辨率,即每个像素对应的步长。如果设置的扫描步长与系统实际的空间分辨率不匹配,将导致合成后的样品图像比例失真。首先通过硬件的一些特性参数,计算检测系统的扫描线长度

$$W = w \frac{D}{f} \quad (1)$$

式中 w ——成像光谱仪的狭缝长度

D ——镜头到样品距离

f ——镜头焦距

W ——实际扫描线长度

再推算出该系统空间分辨率,本系统中光谱仪的狭缝长度为 14.3 mm,样品到镜头的距离约为 370 mm,镜头焦距为 23 mm。根据式(1)可求得该系统实际的扫描线长度约为 230 mm。因此系统的空间分辨率大约为 0.224 6 mm/像素。

通过理论分析计算了系统的空间分辨率。利用 ENVI 分析软件提取铝尺拉曼图像上数值比较清晰位置的像素信息,提取铝尺上 12.5 ~ 13.5 cm 位置处的图像信息。12.5 cm 位置处对应的空间像素点是 367,而 13.5 cm 位置处对应的空间像素点是 412,因此 10 mm 对应的系统上的空间数值是 45 像素,即 0.222 2 mm/像素,与理论计算值基本一致,系统的性能稳定。

4 验证

为了验证系统的准确性和稳定性,制备了一系列不同质量分数的过氧化苯甲酰-面粉混合物,实验配置 0.05% ~ 30% 共 17 个质量分数的混合物进行实验测定。每个样品总质量为 10 g,样品充分混合均匀,盛放在直径为 65 mm 的培养皿中,压实后进

行光谱扫描。图 5a 为该系系统采集样品信息后,感兴趣区域(尽可能覆盖整个样品)的平均原始光谱图,从图中可以看到随着过氧化苯甲酰的含量降低,其主要特征峰(1 001 cm^{-1} 、1 603 cm^{-1} 、1 777 cm^{-1})强度逐渐降低,通过光谱预处理后,建立特征峰强度与过氧化苯甲酰含量的预测模型,图 5b 为采用该模型的预测值与实测值的线性关系, R^2 可达 0.982 8,说明该系统具有较好的准确性和稳定性。

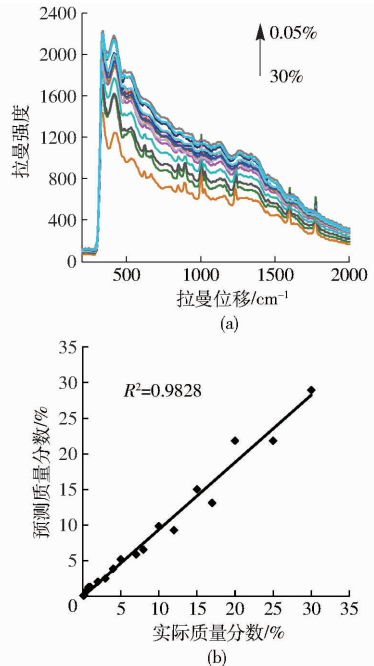


图 5 不同质量分数过氧化苯甲酰-面粉混合物原始平均光谱图和模型预测结果

Fig. 5 Raw Raman spectra of wheat flour with different content of benzoyl peroxide and model prediction results

5 结束语

设计了扫描式拉曼光谱成像检测系统。该系统可实现对检测样品进行实时扫描,同步获取拉曼图像和拉曼光谱。通过对系统进行光谱校正和空间校正,确定 CCD 相机探测的拉曼光谱范围为 $-679.3 \sim 2885.7 \text{ cm}^{-1}$,实际空间分辨率为 0.22 mm/像素。采用 LabView 和 Matlab、ENVI 混合编程,开发了拉曼成像检测系统的实时检测与分析软件。该软件可实现对 CCD 相机、激光光源及移动平移台的控制,完成对检测样品拉曼图像的实时采集成成、显示以及拉曼光谱曲线的动态显示;并可通过数据的提取、代入模型进行分析计算、保存分析结果。设计拉曼光谱成像检测系统,可以提供拉曼图像信息快速收集和显示,大大缩短检测时间,提高检测效率。

参 考 文 献

- 1 TAN K M, SINGH G P, HERRINGTON C S, et al. Near-infrared Raman spectroscopy using hollow-core photonic bandgap fibers

- [J]. Optics Communications, 2010, 283(16): 3204–3206.
- 2 傅霞萍, 应义斌. 基于 NIR 和 Raman 光谱的果蔬质量检测研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 148–164. FU Xiaping, YING Yibin. Application of NIR and raman spectroscopy for quality and safety inspection of fruits and vegetables; a review[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 148–164. (in Chinese)
 - 3 张宇菁, 王蒙, 王泽锋, 等. 啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅制作及 Raman 滤波研究[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 1–15. ZHANG Yujing, WANG Meng, WANG Zefeng, et al. Fabrication of chirped and tilted fiber bragg gratings and filtering of stimulated raman scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 1–15. (in Chinese)
 - 4 QIN J, KIM M S, SCHMIDT W F, et al. A line-scan hyperspectral Raman system for spatially offset Raman spectroscopy[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2016, 47(4): 437–443.
 - 5 DHAKAL S, LI Y, PENG Y, et al. Prototype instrument development for non-destructive detection of pesticide residue in apple surface using Raman technology[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 123: 94–103.
 - 6 廖艳林, 刘晔, 曹杰, 等. 一种基于光纤器件的表面增强拉曼散射光谱检测系统[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 215–219.
 - 7 郭志明, 赵春江, 黄文倩, 等. 苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 227–232. GUO Zhiming, ZHAO Chunjiang, HUANG Wenqian, et al. Intensity correction of visualized prediction for sugar content in apple using hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 227–232. (in Chinese)
 - 8 朱荣光, 段宏伟, 姚雪东, 等. 基于高光谱图像和偏最小二乘的羊肉 pH 值特征波段筛选研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9): 2925–2929. ZHU Rongguang, DUAN Hongwei, YAO Xuedong, et al. Study on characteristic bands selection of lamb pH value based on hyperspectral imaging and partial least squares (PLS)[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9): 2925–2929. (in Chinese)
 - 9 TAO F, PENG Y, LI Y, et al. Simultaneous determination of tenderness and *Escherichia coli* contamination of pork using hyperspectral scattering technique[J]. Meat Science, 2012, 90(3): 851–857.
 - 10 QIN J W, CHAO K L, KIM M S. A line-scan hyperspectral system for high-throughput Raman chemical imaging[J]. Applied Spectroscopy, 2014, 68(6): 692–695.
 - 11 QIN J, CHAO K, KIM M S, et al. Line-scan macro-scale Raman chemical imaging for authentication of powdered foods and ingredients[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 9(1): 113–123.
 - 12 NISHIDA T, KAINO T, IKARASHI R, et al. The effect of coenzyme Q10 included by γ -cyclodextrin on the growth of fission yeast studied by microscope Raman spectroscopy[J]. Journal of Molecular Structure, 2013, 1048: 375–381.
 - 13 刘双龙, 刘伟, 陈丹妮, 等. 相干反斯托克斯拉曼散射显微成像技术研究[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 136–142. LIU Shuanglong, LIU Wei, CHEN Danni, et al. Research on coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy[J]. Acta Phys. Sin., 2016, 65(6): 136–142. (in Chinese)
 - 14 李雪, 高国明, 牛丽媛, 等. 活体小鼠耳朵的拉曼成像方法研究[J]. 分析化学, 2012, 40(10): 1494–1499. LI Xue, GAO Guoming, NIU Liyuan, et al. In vivo Raman imaging of mice ear[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2012, 40(10): 1494–1499. (in Chinese)
 - 15 WANG S, LIANG Z, GONG Y, et al. Confocal Raman microspectral imaging of ex vivo human spinal cord tissue[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2016, 163: 177–184.
 - 16 VRENSSEN G F, OTTO C, LENFERINK A, et al. Protein profiles in cortical and nuclear regions of aged human donor lenses: a confocal Raman microspectroscopic and imaging study[J]. Experimental Eye Research, 2016, 145: 100–109.
 - 17 范贤光, 梁骏, 王昕, 等. 等离激元增强拉曼光谱食用合成色素快速检测系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2487–2491. FAN Xianguang, LIANG Jun, WANG Xin, et al. Design of Raman spectroscopy rapid detection system for synthetic edible pigment based on PERS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(8): 2487–2491. (in Chinese)
 - 18 赵娟, 彭彦昆, 郭辉, 等. 农产品品质检测系统的高光谱成像控制软件设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 210–215. ZHAO Juan, PENG Yankun, GUO Hui, et al. Control and analysis software system for detection in design of hyperspectral imaging agricultural food quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 210–215. (in Chinese)
 - 19 QIN J, CHAO K, KIM M S, et al. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(2): 157–171.
 - 20 QIN J, CHAO K, KIM M S. Raman chemical imaging system for food safety and quality inspection [J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(6): 1873–1882.