# 基于小型化便携式光谱成像技术的分类识别系统研究

张 晨,刘舒扬,赵安娜,王天鹤,贾晓东

(天津津航技术物理研究所,天津 300308)

**摘 要:** 小型化便携式光谱成像越来越多应用于日常生活中,给人们的生活提供了更多的便利。柑橘属水果是人们日常生活中经常食用和储存的水果之一,在智能冰箱中,柑橘由于品种相似等原因不利于识别和分类,光谱成像技术利用其物质不同的特征波长实现其识别。采用新型的单芯片式光谱成像芯片搭建小型化便携式的光谱成像系统,利用光谱成像技术实现对柑橘属水果的分类识别,并通过分批次样本进行交叉验证,同时建立光谱分辨率与准确度关系,通过约束光谱分辨率,有效提高了柑橘属水果分类识别的准确度,光谱分辨率小于 20 nm,识别准确度可达到 95%以上。

**关键词:** 单芯片; 柑橘属水果; 光谱成像; 分类识别; 特征波长

**中图分类号:** TN209 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1023001

# Research on classification and recognition system based on miniaturized portable spectral imaging technology

Zhang Chen, Liu Shuyang, Zhao Anna, Wang Tianhe, Jia Xiaodong

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Miniaturized portable spectral imaging was increasingly used in daily life, providing more convenience for people's lives. Citrus was one of the fruits that people often eat and store in their daily life. In the smart refrigerator, citrus was not conducive to identification and classification due to similar varieties. Spectral imaging technology used its characteristic wavelengths to realize its recognition. A new type of single-chip spectral imaging chip was used to build a compact and portable spectral imaging system. Spectral recognition technology was used to realize the classification and identification of citrus fruits, and cross-validation was carried out by batch samples, simultaneously establish the relationship between spectral resolution and accuracy, by constraining the spectral resolution, which effectively improved the classification and recognition accuracy of citrus fruits. Spectral resolution was less than 20 nm, and recognition accuracy could reach more than 95%.

**Key words:** single chip; citrus fruit; spectral imaging; classification recognition; characteristic wavelength

**收稿日期:** 2019-05-05; **修订日期:** 2019-06-15

**作者简介:** 张晨(1990-),男,工程师,硕士,主要从事光光谱探测和光谱成像系统集成应用方向的研究。
Email:zhangchen_jh@foxmail.com

## 0 引 言

光谱成像技术是一种能够获得目标对象三维信息的成像方法，包括二维的图像信息和一维的光谱信息，图像信息能够反映目标物体的大小、形状和缺陷等外部特征，光谱信息能够反映目标物体的内部物理、化学成分，从而实现物质的识别。光谱成像技术能够在不接触目标的情况下检测目标的特征信息，目前已应用在遥感[1]、生物医学检测[2]、农业检测[3]和食品科学[4]等多个不同的领域。随着 CMOS 技术的发展，在不久的将来，低成本、高速和小型化的光谱成像系统逐渐能够实现了[5-7]。传统的光谱成像系统是由分立器件组成，为了保证空间分辨率和光谱分辨率，引入了物镜、光阑、准直器和各类透镜等光学器件，同时必须考虑各器件之间的聚焦、准直问题，这就导致传统的 HSI 系统复杂度很高，体积较大，成本颇高，应用范围受到极大限制[8]。

小型化便携式光谱成像系统是一种基于 CMOS 半导体工艺的微型光电系统，将复杂的分光元器件直接集成在传感器芯片上，以单芯片形式包含了分光系统、光电探测系统、电路读出系统，从架构上减少了光学元器件的数目，并增强了光电系统的稳定性 [9]。文中采用的小型化便携式光谱成像微系统采用的结构，其采用多台阶式 FP 腔与 CMOS 图像传感器的芯片单片集成在一起构成新型光谱成像芯片，其多台阶 FP 腔结构是采用氮化硅和氧化硅两种介质交替组成顶层和底层布拉格镜，使用氧化硅作为 FP 腔体夹层[10]。

食品产业与人民生活息息相关，水果是人们日常生活中必不可少的一部分，为保证水果质量，满足消费者的需求，目前利用传统相机拍摄的彩色图像无法实现分类识别柑橘属水果的功能。当前智慧冰箱是智慧美食生态圈中重要的组成部分，而种类识别功能是智慧冰箱中最基础的功能之一。光谱成像技术作为一种新型的无损检测技术，融合了图像学和光谱学的优点，可以快速、无损的获取水果的空间和光谱图像信息，能够实现对水果的种类的精确识别。

文中通过对新型的单芯片式的小型化便携式光谱成像微系统的光谱识别处理功能进行验证，以柑橘属水果分类为目标，对其原始光谱图像数据进行处理，结合其谱线特征及冰箱内环境因素的影响，分析分类的可行性，通过对光谱图像数据进行特征提取和分类研究，实现了对柑橘属水果的种类分辨，实现了不同批次的种类辨别，确定分类识别算法的处理流程，验证了小型化便携式光谱成像技术分类识别的功能。

## 1 系统组成

该实验主要是由光源环境、采集实验和样品部分组成。光谱值是由产生的均匀光源照射在样本水果表面的反射率。为了实现光谱的准确性，在实际环境中需要均匀且稳定的光源条件，均采用光谱均一性较好的卤素灯作为光源，光源环境如图 1 所示。

采集实验部分采用的是单芯片光谱成像微系统相机（见图 1），同时采用海洋光学的 HR4000 光谱仪和 SPECIM 的高光谱成像仪采集数据进行对比验证，其光谱范围为 400~1 000 nm，图 2 中白板采用 SphereOptics 标准白板作为基准，黑板采用直接封闭探测头获取其光谱值。样品部分是柑橘属内的水果，包括西柚、柠檬、橙子和橘子 4 种水果。

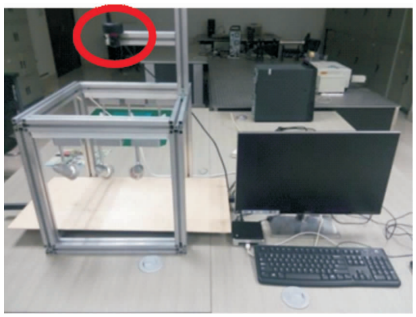


图 1 水果分类实验环境

Fig.1 Fruit classification experiment environment

图 2 光谱采集设备

Fig.2 Spectral acquisition equipment

## 2 实验原理及流程

文中设计的实验主要针对柑橘属水果种类的分类识别,实验处理流程分为训练样本像素选择,类内和类间差异分析,特征谱线提取和混合样本分层的分类识别。其流程图如图 3 所示。

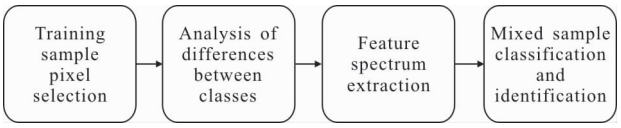



图 3 水果分类识别算法处理流程

Fig.3 Processing flow of fruit classification recognition algorithm

首先分别对两批原始光谱数据进行处理,;然后在同批次训练集与测试集相互独立情况下的测试,最后在进行跨批次下的训练集与测试集相互独立情况下的测试。具体数据流程是:先筛选 4 种水果的原始光谱图像数据,选择反光程度不严重,图像清晰的数据进行分析;随后选择目标物体上的训练样本像素,选择非反光区域具有代表性 ROI 区域,进行类内差异对比,选择类内差异性较小的作为训练集,然后结合类间差异性,综合选择提取能够实现 4 种水果分类的特征谱段,利用特征谱段完成对水果的分类识别。

提取特征谱段之后,对水果进行分类识别,所采用的是最大似然分类法,其内涵是在两类或者多类判决中,用统计方法根据最大似然比贝叶斯判决准则法建立非线性判别函数集,假设各类分布函数为正态分布,并选择训练区,计算各待分类样本的归属概率,而进行分类的一种图像分类方法[11]。

其主要过程如下:

(1) 确定需分类的样本和特征波段以及分类数;(2) 根据已掌握的样本情况,在图像上选择训练区;(3) 计算参数,根据选出的训练样本数据,计算先验概率;(4) 分类,对待测区域的像素逐个代入公式,对于每个像素值,分几类计算几次,最后比较大小,选择最大值得出类别;(5) 产生分类图,给每个类别规定一个数值,如分为 10 类,则每一类分别为 1,2,3,…,10,分类后的像素值使用类别值代替,最后得到分类图像,由于最大灰阶值等于类别数,在显示器上显示需要给各类加上不同彩色;(6) 检验结果,如果分类中错误较多,需重新选择训练样本再进行以上步骤,重复迭代。

最大似然分类法优点是简单,实施方便,并且以贝叶斯理论和其他先验知识融合分类,密度分布函数可以有效,清晰地解释分类结果,这类方法适用于波段数较少的数据,其主要缺点是分类时间随着波段信息的增加成二次方增加,对训练样本要求较高,训练样本必须大于波段数,仅方便估计光谱均值向量和协方差矩阵参数。

该设计针对的水果光谱曲线特征区分明显,特征光谱数据维度较低,波段数较少,故选择分类简单,实施方便的最大似然法进行分类。

## 3 结果分析

按照柑橘属水果种类分类识别实验要求,从光谱特征谱线分析和分类识别两部分,分别对两批不同时间采集的 4 种水果进行处理和分析。

根据第一批云香科柑橘属西柚、橙子、柠檬三种水果样本数据,各提取非镜面反射区域的 2 000 pixel 作为训练样本集合,训练集平均光谱情况如图 4 所示,红色、绿色、蓝色曲线分别表示对应西柚、橙子及柠檬三类水果平均光谱谱线。

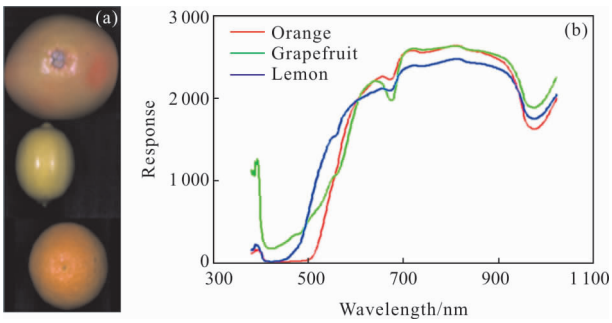
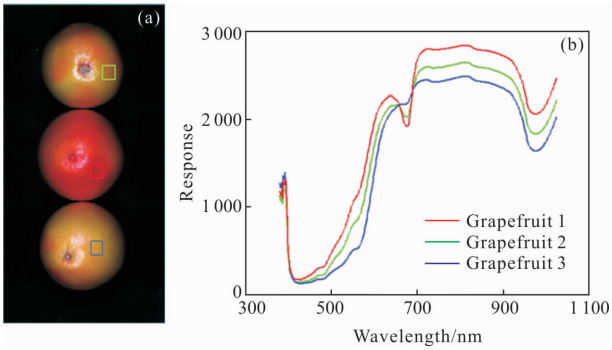



图 4 第一批数据三类水果样本平均谱线对比

Fig.4 The first batch of data, average line contrast of three types of fruit samples

由图 4 可知,三类水果样本谱线在 700~900 nm 范围内差异较小,而在 500~700 nm 谱段之间存在差异特征。为了根据光谱数据实现对以上三类水果的区分,在分析样本类间差异的同时需综合考虑各类样本间类内差异。以西柚样本为例,图 5(b)表示图 5(a)中不同西柚样本所标定区域选取的 500 pixel 平均所得谱线,由谱线的差异可见,西柚样本具有较大类差

异。近一步选取三类水果各 6 组谱线，得到图 5(c)所示三类水果混合谱线图。



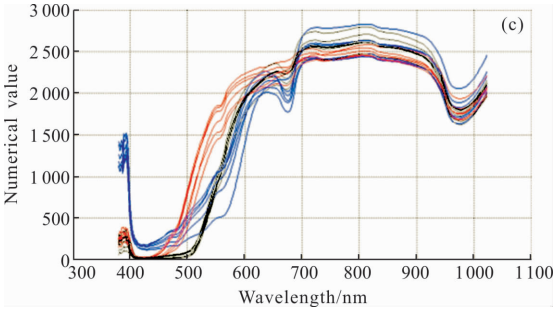




图 5 (a)不同西柚样本，(b)西柚类内差异分析，(c)三类水果类内差异分析

Fig.5 (a) Different grapefruit samples, (b) analysis of differences in grapefruit, (c) analysis of differences in three types of fruits

由图 5(c)所示谱线图可知，500~700 nm 间三类水果样本类间差异受类内差异影响最小，故在该范围内选择 500 nm 及 675 nm 两谱段作为特征谱段。选择最大似然法通过全谱段对三类水果进行分类识别可得到图 6(a)所示较为准确的识别结果。采用最大似然法通过 500 nm 及 675 nm 两特征谱段对三类水果混合样本进行分类识别，依然可得到较为准确的分类识别结果，特征谱段下分类识别结果见图 6(b)。

第二批样本数据在第一批样本数据基础上增加了芸香科柑橘属的橘子样本及四类水果相应随机混合样本。首先选取择非镜面反射区域的 2 000 pxiel 作为第二批数据训练像素，并对第一批数据实验所得结论进行检验分析。

根据第一批数据所得特征谱段(500 nm 及 675 nm)对第二批数据中西柚、橙子、柠檬三类水果混合样本采用最大似然法进行分类识别，以同批次训练集对该批次下三类水果混合样本进行分类，可得到图 7 所示较为准确的分类结果。

由图 7 的分类识别结果可知，第一批数据分析

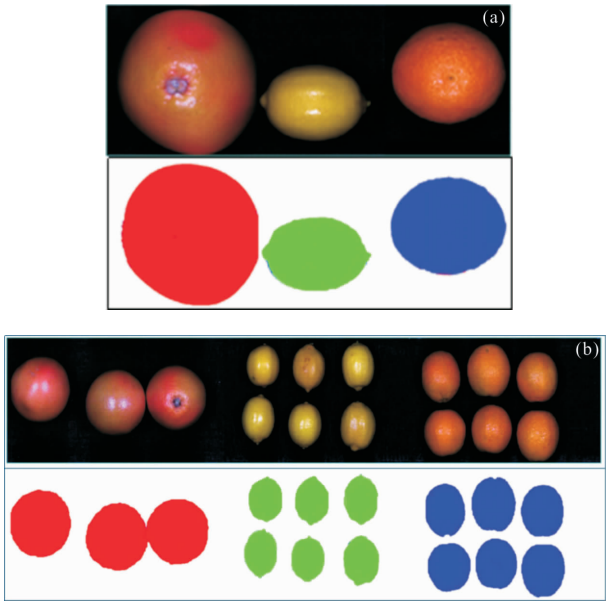



图 6 (a)样本全谱段识别结果，(b)特征谱段(500、675 nm)分类识别结果

Fig.6 (a) Full spectrum recognition result, (b)characteristic spectrum(500, 675 nm) classification and recognition results

图 7 第二批数据混合样本特征谱段分类结果

Fig.7 The second batch of data mixed sample feature spectrum segment classification results

所得特征谱段在第二批次水果样本分类识别中依然有效。近一步采用第一批样本所选训练集，采用最大似然法训练分类器，根据所选两特征谱段对第二批混合样本进行分类识别如图 8 所示，可得较为准确的分类识别结果。跨批次实验中，第一批数据实验所选取的 500 nm 及 675 nm 特征谱段在此次实验中有效克服了两次实验中使用的实验样本品种差异、光源情况差异(强度)及物距差异、遮挡、镜面反射等外界因素对分类识别的影响，使第一批数据实验过程中特征谱段选取得到了有效验证。

其次，考虑新增橘子样本，对四类水果(西柚、橙子、橘子、柠檬)谱线差异进行分析。根据四类水果所选取的 2 000 训练集像素，提取各样本平均谱线进行

分析。四类样本平均光谱见图 9,红色、绿色、黑色、蓝色谱线分别表示西柚、橙子、橘子、柠檬平均光谱。

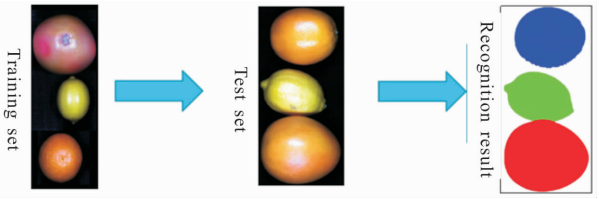



图 8 跨批次特征谱段分类识别

Fig.8 Cross-batch feature spectrum classification and recognition

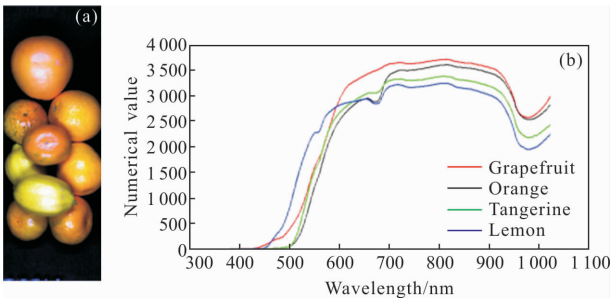



图 9 第二批数据四类水果平均谱线对比

Fig.9 The second batch of data, the average line contrast of four types of fruits

由图 9 中四类水果谱线分析可得,新增橘子样本与橙子样本谱线在 500~700 nm 区域差异较小,难以区分,而在 980 nm 左右区域存在强度差异,故选择 980 nm 作为第三特征谱段。据特征谱段对图 9 中混合样本进行分析,可得到分类识别结果如图 10 所示。

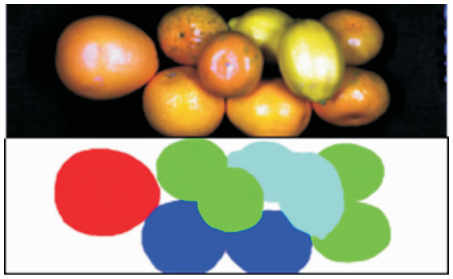


图 10 四类水果三特征谱段(500、675、980 nm)分类识别结果

Fig.10 Classification and recognition results of four types of fruit three characteristic spectrum segments (500, 675, 980 nm)

根据图 10 中分类识别结果,确定 500、675、980 nm 为分类识别三特征谱段。根据三特征谱段对四类水果混合样本(共计 32 个)进行分类识别,逐步增加谱段分辨率为 1、10、20、30、40、50 nm,采用最大似然法根据特征谱段对混合样本进行分类识别,计算在不同分辨率下对 32 个混合样本识别准确率,得到准确率随分辨率增加变化曲线如图 11 所示。

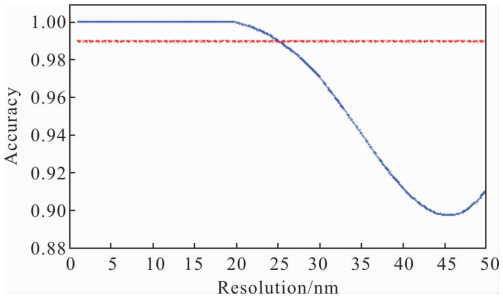



图 11 三谱段分类识别准确率与谱段分辨率关系

Fig.11 Relationship between the accuracy of the three-segment classification and recognition of the spectral segment

由图 11 可知,随着分辨率增大,对混合样本分类识别准确率下降,为保证分类识别结果准确率不低于 95%,所采用硬件光谱分辨率应不低于 20 nm。本组分类识别实验所确定的光谱分辨率对后续低成本硬件开发提供了可靠依据,起到了有效指导作用。

## 4 结 论

文中主要是对小型化便携式的光谱成像微系统的分类识别功能进行验证,以柑橘属水果分类识别为实验对象,确定了柑橘属水果分类识别的处理流程,以及对影响柑橘属水果分类的因素进行分析,确定柑橘属水果分类的特征谱段,并进行了分批次样本的交叉验证。以此确定了在冰箱内等食品存储设备中实现智能化检测水果种类识别的功能的可行性,为小型化便携式光谱成像技术的应用和推广提供了理论依据和技术支持。

**参考文献:**

[1] Gowen A A, Donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging-an emerging process analytical tool for food quality and safety control [J]. ***Trends in Food Science & Technology***, 2007, 18(12): 590-598.

[2] Gayen S, Alfano R. Sensing lesions in tissues with light [J]. ***Optics Express***, 1999, 4(11): 475-480.

[3] Saari H, Pellikka I, Pesonen L, et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest

and agriculture applications [C]//Proceedings of SPIE,the International Society for Optical Engineering, 2011, 8174: 466-471.

[4] Pu Ruiliang, Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing Technology and Applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.(in Chinese)

[5] Tack N, Lambrechts A, Soussan P, et al. A compact, high-speed, and low-cost hyperspectral imager[C]// Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2012, 8266: 16.

[6] Geelen B, Tack N, Lambrechts A. A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic[C]// Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2014: 8974.

[7] Geelen B, Tack N, Lambrechts A, et al. A snapshot multispectral imager with integrated tiled filters and optical duplication [C]// Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2013, 8613:861314.

[8] Liu Shuyang, Zhang Chen, Zhang Yunhao, et al. Miniaturized spectral imaging for environment surveillance based on UAV platform [C]//AOPC 2017: Optical Spectroscopy and Imaging, 2017: 10461.

[9] Liu Shuyang, Zhou Tao, Jia Xiaodong, et al. Feasibility study of a novel miniaturized spectral imaging system architecture in UAV surveillance[C]//International Society for Optics and Photonics, 2016.

[10] Liu Shuyang, Zhou Tao, Jia Xiaodong, et al. Study on monolithically integration miniaturized spectral imager by Fabry-Perot with Bragg stack [C]// International Society for Optics and Photonics, 2016.

[11] Lo E, Ientilucci E. Transformation for target detection in hyperspectral imaging [C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2017.