

基于 DSP 系统的芒果品质检测平台构建

Construction of mango quality inspection platform based on DSP system

潘俊洋 项辉宇 薛真

PAN Jun-yang XIANG Hui-yu XUE Zhen

(北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048)

(College of Materials and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

摘要:为实现对芒果的大小、成熟程度以及腐烂程度的检测判断,构建一种基于 DSP6437 开发板的检测平台。在该平台上进行图像采集及数据流的转换,得到 RGB 和灰度图像,运用超限邻域平均法对图像进行平滑去噪,获取感兴趣区域,根据区域灰度均值对芒果成熟程度进行判断分类。通过拉普拉斯变换计算芒果边缘点,并旋转求出最小包围矩形,对芒果大小进行判断分类。运用灰度直方图统计的视觉检测与气味传感器相结合,对芒果腐烂程度进行判断分类。研究表明:该检测平台体积小,运行稳定,检测准确,适用于芒果生产检测。

关键词:芒果;品质检测;DSP;传感器

Abstract: In order to realize the detection of mango size, maturity and degree of decay, a test platform based on DSP6437 development board was constructed. Image acquisition was carried out on this platform, with conversion and collection of the data stream. Therefore, the RGB and grayscale images were obtained, the super neighborhood average method for smoothing the image was used to detect the region of interest, and according to the regional average gray degree of maturity, the classification of mango was determined. The edge points of mango were calculated by Laplace transform, and the minimum envelope rectangle was rotated to judge the size. Combining the visual inspection with gray histogram statistics and the taste sensor, the ripeness of mango was determined. The experimental results showed that the detection platform was small, stable, accurate and more suitable for actual production detection, and was also practicable for the inspection of mango production.

Keywords: Mango; Quality inspection platform; DSP; sensor

芒果的品质主要由其大小、成熟度、腐坏程度决定,而且

成熟的芒果更易腐烂,并极易造成周围芒果的共同腐烂。近年来,随着人工智能的不断发展,视觉检测技术使芒果的无损检测得以实现。刘静等^[1]通过面积获取,利用线性回归分析确定测量值和真实值之间的相关性,以此进行芒果表面缺陷的分级。李甦等^[2]通过大量统计水果表面颜色的分布规律提出了“数量—程度”“大小—评价测光值”2种空间模型来实现缺陷检测和分级。康志亮等^[3]利用微处理器结合可见光/近红外漫反射原理进行数据的处理和分析,以此来对苹果是否受损进行识别和分类。赵杰文等^[4]利用高光谱图像技术,提取 547 nm 波长下的图像,并通过不均匀二次差分图像处理技术检测苹果表面损伤,正确率达到 88.57%。但上述方法对试验环境和设备要求较高,速度不够高,不利于实际生产流水线上的检测。党宏社等^[5]提出了运用 ARM 嵌入式技术对芒果进行检测和分级,但仍未能脱离对现有 QT/Embedded 软件平台的依赖,并且只能做到对尺寸的检测分级。本试验基于 DSP 开发板构建检测平台,对芒果品质进行视觉的检测,同时将味觉传感器与视觉检测相结合,为芒果及类似的水果检测提供一种较好的方法。

1 检测平台基本架构

1.1 主要硬件构成

1.1.1 DSP6437 开发板 与 PC 产品相比,DSP 系统集成度更高,速度更快,功耗更小。其强大的数学运算能力使得实时图像处理得以更好实现。基于达芬奇三代的架构的 DM6437,专门适用于对数字视频、图像采样处理、视觉分析等应用进行剪裁和优化。并且美国 TI 公司的 DSP 支持汇编语言、ANSI 的标准 C 语言,应用范围更广。

1.1.2 传送带 将芒果放在传送带上进行运输,模拟生产输送中的流水线作业。为了触发 CCD 相机进行一帧图像的获取,选用 M12 激光传感器,当芒果传送到传感器处,触发程序进行图像捕捉、处理。

1.1.3 气味检测传感器 本试验选择的 QS-01 传感器是一种新型的二氧化锡半导体气体传感器,不仅响应时间短,而且对腐烂所产生的硫化氢等异味气体有着很高的灵敏度。

基金项目:2017 年研究生科研能力提升计划项目

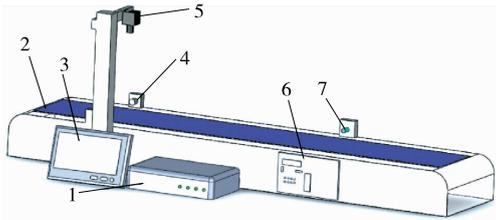
作者简介:潘俊洋,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:项辉宇(1966—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: xianghy@th.btbu.edu.cn

收稿日期:2017-09-09

传感器采用塑料作为外壳,可以在极低的功耗下获得极好的感应特性,和 51 单片机的 ADC 模块结合使用,检测准确。



1. DSP6437 开发板 2. 传送带 3. 显示屏 4. M12 激光传感器
5. CCD 6. 51 单片机 7. QS-01 气味传感器

图 1 试验检测平台

Figure 1 Experimental platform

1.2 检测方法及其流程

本试验搭建的检测平台,将 OpenCV 图像处理算法移植于 DSP 中,并与 DSP 快速的数据处理速度相结合。通过 CCD 采集图像信号,经过解码器 TVP5150 转换成格式为 YUV422 的 8-bit 数字信号,调用 VLIB 库函数将其转换为常用的 RGB 格式,存储在片外存储空间 DDR2 中。筛选获取包含芒果的矩形连通区域,将感兴趣区域灰度化,以其均值判断成熟度。为了极大保护图像细节优化后续处理,采用超限邻域平均法进行平滑滤波。运用二值化进行图像分割,二阶微分拉普拉斯算法计算芒果边缘,通过直方图统计腐烂区域大小,并将气味传感器综合检测判断腐烂与否,相较于单一的视觉检测更为准确。试验流程见图 2。



图 2 试验流程

Figure 2 Experimental process

2 关键技术及实现

基于 DSP6437 搭建芒果品质检测平台,关键技术包括 EMCV 移植、视频图像处理及平台算法优化。

2.1 EMCV 移植

DM6437 目前只支持美国 TI 公司提供的 VLIB 和 IMGLIB 视频图像处理算法库,但这 2 个库仅提供了很少量的基本图像算法,远不能支持一个完整全面的应用算法开发,并且在使用过程中有很多的限制。OpenCV 拥有丰富的图像处理算法,由一系列的 C 和 C++ 编写而成,并提供了

多种其它语言形式 (Python、Ruby) 的函数接口,包含了机器视觉和视频图像处理领域的许多通用和高级算法。其移植性较强,目前已有很多移植到 ARM 和 DSP 平台的成功先例^[6],选用 OpenCV 视觉库进行 DSP 环境移植方便可行。OpenCV 总共有五大模块,有些是不需要进行移植的(例如 Highgui 图像界面模块),本次试验主要对 OpenCV1 进行了 DSP 的移植,移植了 CV(核心算法)和 Cxcore(数据结构支持)2 个模块(见图 3),在 DSP 中以 EMCV 的形式呈现。

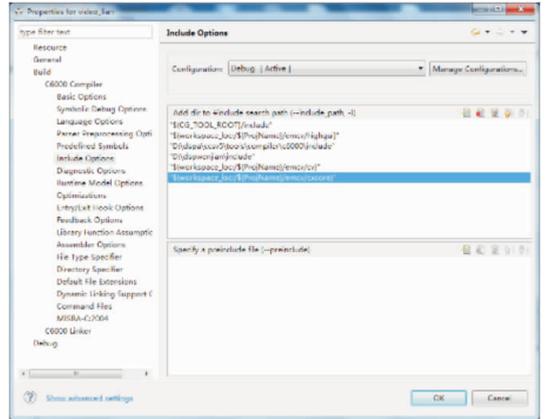


图 3 EMCV 移植

Figure 3 EMCV transplantation

2.2 视频采集及成熟程度判定

由于 YUV 与 RGB 视频信号相比,在传输过程中只需要占用极少的频宽,所以多用于优化的彩色视频信号的传输。DSP 中通过 CCD 捕捉到的图像通常都通过 YUV 信号进行传输,通过 VPFE 对 CCD 的各项参数进行设定,调用 vpfe_init 获取一帧图像数据的首地址,调用 VLIB_convertUYVYint_to_RGBp1(Uint8*)进行 YUV 与 RGB 的转换^[7],便于图像运用算法进行处理。

2.2.1 图像灰度化 图像灰度化就是将原彩色图像上的三原色 R、G、B 的亮度值按式(1)进行运算,依次将算出的灰度值赋给新图像相对应的像素位置处^[8]。灰度图像矩阵元素的取值范围通常为[0,255]。通过多次对比发现:熟透芒果的灰度值高于未成熟的。为了保证计算的实时性,通过 VLIB 中的 VLIB_create Connected Componentslist 函数进行连通区域查找,通过 VLIB_getCCFeatures 遍历每个连通区域,并获取每个连通区域的长、宽、高等属性,以此对连通区域进行筛选,除去极小的干扰区域,得出包含芒果的矩形区域的位置,利用循环语句遍历区域图像灰度值,求出灰度均值,以此来判断其成熟程度。

$$H = \frac{299 \times R + 587 \times G + 114 \times B}{1000}, \quad (1)$$

式中:

- H——遍历点灰度值,像素;
- R——遍历点红色像素值,像素;
- G——遍历点绿色像素值,像素;
- B——遍历点蓝色像素值,像素。

2.2.2 超限邻域平均法平滑除噪 由于试验环境及硬件设

备的影响,采集到的图像不可避免地会有噪声的存在,噪声会将一个简单阈值处理的问题变得难以解决。所以为了避免干扰,一般会在图像预处理时对图像进行平滑滤波。

本试验采取了超限邻域平均法^[9]对图像进行了滤波操作,其原理是:当某个像素点处的灰度值减去其邻域灰度均值大于某个设定的阈值时,才会执行均值滤波操作。相比于最常用的均值滤波方法,该算法不仅能有效地消除图像噪声,而且保护了较小灰度差下的图像细节(见图 3)。超限邻域平均法的表达式(2)。

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & \text{其他} \\ f_a(i, j) & [f_a(i, j) = f(i, j) - f_a(i, j)] > T \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$f(i, j)$ ——原图像中的灰度值,像素;

$f_a(i, j)$ ——原图像中邻域的灰度平均值,像素;

T ——分割阈值,像素;

$g(i, j)$ ——变换后的图像灰度值,像素。

2.2.3 二值化及拉普拉斯算法计算大小分级 二值化是图像处理的基本算法,常用于图像分割,将目标物体与背景区分开来^[10]。对于受外界干扰较小的图像,根据直方图寻找波谷,以波谷值作为阈值对图像进行二值化分割。

拉普拉斯求边缘是一种二阶微分算法,具有旋转不变性,较之常用的一阶边缘算法(梯度算法、sobel 算法等)更为准确^[11-12]。二维函数 $f(x, y)$ 的拉普拉斯运算可以定义为:

$$\Delta^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \quad (3)$$

式中:

$\Delta^2 f$ ——该点处灰度函数二阶微分值;

$f(x, y)$ —— x, y 像素坐标处的灰度值函数,像素。

定义 2 个数组,将检测到的边缘点放入 2 个数组中。以图像中心作为旋转中心,旋转的角度为 α ,设置 $\alpha[0, 90]$ 变化的循环,通过比较得出包含芒果的最小矩形的面积,以此判别芒果的大小,进行分级。

2.2.4 灰度直方图统计检测腐烂区域 灰度直方图是关于灰度值的函数,是图像检测处理中最常用的方法之一^[13]。在一个连续的灰度图像中,通常将灰度值为 D 的所有轮廓线所包含的面积记为 $A(D)$,则灰度直方图可以定义为:

$$H(D) = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \frac{A(D) - A(D + \Delta D)}{\Delta D} = \frac{d}{dD} A(D), \quad (4)$$

式中:

$H(D)$ ——灰度值为 D 的像素点个数;

D ——灰度值,像素;

$A(D)$ ——灰度值为 D 的所有轮廓线包含的面积,像素。

对于离散函数 $\Delta D = 1$,则上式可以简化为 $H(D) = A(D) - A(D + 1)$,所以,对于任意数字图像,面积函数 $A(D)$ 就是大于或等于 D 的像素点的个数。

根据多次检测试验,统计分析灰度直方图中 3 个波峰分别代表的含义(背景、腐烂区域和未腐烂区域),根据统计结

果,区分背景、腐烂区域和未腐烂区域,分别计算出 3 个范围内的像素点的数目,以此判断出芒果是否已经腐烂及腐烂区域的面积大小。

2.3 平台优化

2.3.1 C 代码优化 由于 DSP6437 的内部寄存器是 32 位的,通过内核 8 个执行单元进行数据处理时,DSP 编译规则规定了 long 型数据为 40 位,使用 long 型数据会更多地占用执行单元,延长程序运算时间。DSP 处理 short * short 类型的数据运算时只需要一个指令周期,而执行 int * int 运算时需要 5 个指令周期。因此,进行定义数据时尽量使用 short 类型,可以极大地减少内存消耗和程序运行时间。

在进行边缘检测后,对图片进行旋转时,根据实际需求,只需对拉布拉斯求边缘后的边缘点的坐标进行旋转,这样极大地减少了程序循环计算次数及运行时间。以 100×100 的目标物为例,旋转图片一次的计算量为 10 000,而只对边缘坐标进行旋转的计算量仅为 400,极大地改善了程序的运行。

2.3.2 存储空间优化 存储空间的优化主要通过 .tcf 文件中的存储器管理模块来实现^[14]。因为 C 编译器中堆的大小默认值为 1 KB,而通常获取一帧图像进行算法运算时所需要的动态内存 $\gg 1$ KB,并且 DM6437 的片内存储资源有限,因此需要从 DM6437 的片外存储空间 SRAM 和 DDR2 中分配出一部分空间作为堆,进行图像数据的存储和运算,而将一些全局性的结果变量及数值存储到片内存储中拥有 80 KB 空间的 L1D 中。通过手动划分内存可以极大地节省代码运行时间。动态内存使用 malloc() 进行空间分配,使用完后立刻调用 free() 进行释放,置空指针,防止内存溢出。

2.3.3 并行处理 DM6437 采用了美国 TI 公司第三代超长指令集结构 (VelociTI3),内置 TMS320C64x + DSP 内核,能够同时进行 8 个 8 位或 4 个 16 位的并行 MAC 运算,而且能实时处理 8 路 CIF 或 3 路 D1 格式的编码算法。CCS 是 DSP 的集成开发环境,能够实现实时、多任务的开发。合理地将程序进行分模块的编写,并且分配好优先等级,通过 .tcf 文件合理的配置分配任务管理器,将可并行处理^[15]的程序模块链接入管理器中,极大调用了 DSP 的高速内核运算功能,节省了程序运行时间。

2.3.4 图像处理库的使用 在 DSP 开发中,为了节省开发时间和难度,TI 将一些成熟的算法封装为模块,供开发者使用。如果能充分利用这些算法支持库,对于加快 DSP 开发进程与提高代码质量、稳定性有非常大的帮助。在图像处理领域,TI 公司给用户提供了 VLIB、IMGLIB、IQMATH 等图像处理库^[16],本检测平台主要运用到的是 VLIB 和 IMGLIB。本试验将 VLIB 库添加到了工程文件并多次调用其算法,包括 YUV 转 RGB、灰度化、连通区域的查找筛选等,并使用了 IMGLIB 库的图像格式转换、图像滤波以及编解码压缩等函数功能,极大缩短了程序运行的时间。

2.3.5 程序固化烧制 算法的 DSP 实现、DSP 程序的移植、优化和程序测试工作完成之后,需要将可执行代码固化^[17]到 DSP 设备中,使程序能够在脱离 PC 机的情况下通电自行启动。DM6437 提供 3 种引导模式:ROM 引导、仿真引导和

主机引导,最常用的是ROM引导方式,即通过片上Boot-Loader引导程序启动。而SEED公司的DM6437开发板程序的烧写,只需要将程序.out文件通过相应的项目程序复制写入到FLASH首地址的内存即可,每次启动时程序通过二级引导程序就可烧写至执行程序首地址内存段。

2.4 检测试验

搭建好试验平台,将芒果放在传送带上,开启传送带和采集视频图像。采集到的原始图像经连通区域筛选后的图像见图4。

2.4.1 芒果图像灰度化 经过灰度化处理,见图5。

2.4.2 超限邻域平均法平滑去噪 超限邻域平均法平滑去噪后的图像见图6。

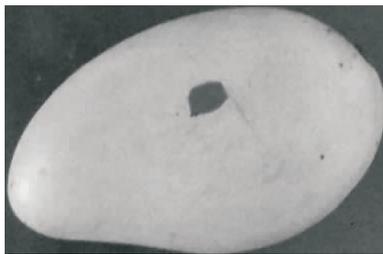


图4 采集的芒果图像
Figure 4 Acquired image

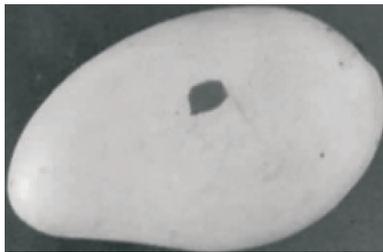


图5 灰度化图像
Figure 5 Grayscale image

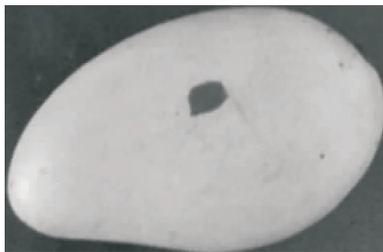


图6 灰度滤波图
Figure 6 Grayscale filter

2.4.3 芒果大小分级 根据图像二值化及拉普拉斯算法的计算结果,设置 $\alpha[0,90]$ 变化的循环,通过比较得出包含芒果的最小矩形的面积,以此判别芒果的大小,进行分级。芒果面积及分级结果见表1。

2.4.4 判断芒果是否腐烂 通过多次检测发现,芒果腐烂部位的灰度值与未腐烂区域有明显的差异。由图7可知,灰度直方图有3个波峰,依次为背景、腐烂区域和未腐烂区域。通过直方图可以计算出这一范围内(灰度值为40~65)的像

表1 芒果面积及分级

Table 1 Surface area and classification of mango

编号	面积	等级	编号	面积	等级
1	14 744	小	16	43 416	中
2	16 686	小	17	33 957	中
3	12 831	小	18	36 190	中
4	11 340	小	19	44 825	中
5	11 696	小	20	44 772	中
6	12 460	小	21	95 000	大
7	11 730	小	22	78 496	大
8	13 630	小	23	71 020	大
9	10 906	小	24	84 216	大
10	15 958	小	25	81 360	大
11	35 264	中	26	64 923	大
12	30 246	中	27	55 726	大
13	27 135	中	28	63 428	大
14	22 692	中	29	66 381	大
15	29 436	中	30	83 622	大

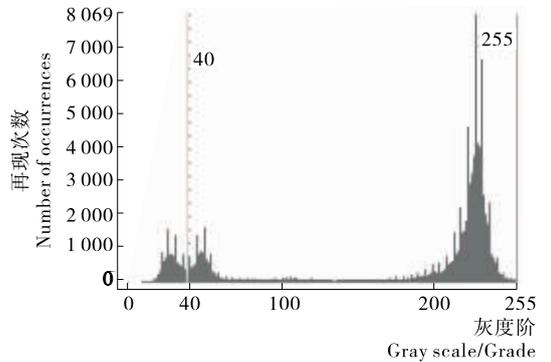


图7 腐烂芒果灰度直方图

Figure 7 Rotten mango grayscale histogram

素点的数目,以此判断出芒果是否已经腐烂,并可得出腐烂区域的面积大小。

2.4.5 气味觉传感器的综合判定 本试验在视觉检测的基础上,结合空气质量传感器QS-01对芒果腐烂与否进行了综合的判断。该传感器能将特殊气体(腐烂气体、农药残留气体)的含量转变为电阻大小的变化,将输出的电压变化通过51单片机的A/D转换模块转换并显示在数码管上。通过多次试验,检测到腐烂的芒果经过传感器时输出的电压值都高于90 mV。该方法比单方面的视觉检测的判断更为准确。

3 结论

基于DSP6437开发板构建了芒果品质检测平台,将视觉检测和味觉传感器结合起来判断芒果的品质,包括用输出LED灯亮、暗模拟实际生产线运作,对芒果的大小、成熟程度以及是否腐烂进行分级分类。相较传统的单方面的视觉检测准确度更高。DSP视觉检测的运用,极大提高了检测速度,可满足实际生产需求,并且体积小,运行稳定,更适应实际检测环境。由于试验条件的影响未能对芒果进行全面的图像采集,腐烂区域可能现于检测背面,造成误检。在实

(下转第136页)

谱的 PLSR、LS-SVM 模型,结果表明,在 PLSR 模型中,FS-PLSR 模型较好,GAPLS-LS-SVM 模型效果最优;在 LS-SVM 模型中,GAPLS-LS-SVM 效果最优,利用 GAPLS 法提取的特征波长代替全波段建立 LS-SVM 模型是可行的。对比 2 种建模方法,确定 GAPLS-LS-SVM 鸡蛋新鲜度预测模型最优,其 R_c 为 0.899, RMSEC 为 2.092; R_p 为 0.832, RMSEP 为 2.423。

参考文献

[1] 毕夏坤, 赵杰文, 林颖, 等. 便携式近红外光谱仪判别鸡蛋的贮藏时间[J]. 食品科学, 2013(22): 281-285.
 [2] 朱云鹏, 崔春利, 王兰娇, 等. 哈尔滨市售鸡蛋品质及营养成分分析[J]. 食品工业, 2017(5): 289-292.
 [3] 王巧华, 任奕林, 文友先. 基于 BP 神经网络的鸡蛋新鲜度无损检测方法[J]. 农业机械学报, 2006(1): 104-106.
 [4] 邢志中, 张海东, 王孟, 等. 基于计算机视觉和神经网络的鸡蛋新鲜度检测[J]. 江苏农业科学, 2017(11): 160-163.
 [5] 赵杰文, 毕夏坤, 林颖, 等. 鸡蛋新鲜度的可见-近红外透射光谱快速识别[J]. 激光与光电子学进展, 2013(5): 213-220.
 [6] LIN Hao, ZHAO Jie-wen, SUN Li, et al. Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(2): 182-186.
 [7] GIUNCHI A L, BERARDINELLI A N, RAGNI L, et al. Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(2): 142-148.
 [8] 李佳婷, 王俊, 李园, 等. 基于电子鼻的鸡蛋新鲜度检测[J]. 现代食品科技, 2017(4): 300-305, 188.
 [9] SMITH D P, LAWRENCE K C, HEITSCHMIDT G W.

Fertility and embryo development of broiler hatching eggs evaluated with a hyperspectral imaging and predictive modeling system[J]. International Journal of Poultry Science, 2008, 7(10): 1 001-1 004.

[10] 王巧华, 周凯, 吴兰兰, 等. 基于高光谱的鸡蛋新鲜度检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2016(8): 2 596-2 600.
 [11] JOHNSON III Owen N, SLIDELL Mark, KREISHMAN Peter, et al. Hyperspectral imaging: an emerging technology as a potential novel adjunct in assessing peripheral perfusion deficits and success of lower extremity revascularizations[J]. Journal of the American College of Surgeons, 2008, 207(3): S114.
 [12] 吴龙国, 何建国, 贺晓光, 等. 高光谱图像技术在水果无损检测中的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 990-996.
 [13] ELMASRY G, WANG Ning, ELSAYED A. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 98-107.
 [14] 牡丹萌, 王风诺, 王世平. 鸡蛋新鲜度随储藏条件变化规律的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(5): 26-29, 33.
 [15] 王巧华, 李小明, 段宇飞. 基于 CUVE-PLS-DA 的鸡蛋新鲜度在线检测分级[J]. 食品科学, 2016(22): 187-191.
 [16] GALVÃO Roberto Kawakami Harrop, MÁRIO César Ugulino Araujo, GLEDSON Emidio Jose, et al. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67: 736-740.
 [17] 张明锦, 杜一平. 蒙特卡洛-偏最小二乘回归系数法用于近红外光谱变量筛选[J]. 分析试验室, 2013(2): 12-16.
 [18] 刘善梅. 基于高光谱成像技术的冷鲜猪肉品质无损检测方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015; 26-41.

(上接第 130 页)

际的生产中需要对滚动的芒果进行实时连续的图像采集, 保证实现全方位的检测, 提高检测准确率。针对此不足之处, 下一步的研究需要针对芒果全部区域进行检测, 由综合试验结果判断芒果品质。

参考文献

[1] 刘静, 黄勇平, 章程辉. 视觉系统开发模块在芒果果面缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械, 2009, 25(2): 82-85.
 [2] 李甦, 谭永龙, 杨美英. 芒果分级与表面缺陷检测研究[J]. 计算机工程与设计, 2008(15): 3 954-3 957.
 [3] 康志亮, 陈韵羽, 王思, 等. 便携式受损芒果检测装置的设计[J]. 农机化研究, 2010(12): 52-56.
 [4] 赵杰文, 刘剑华, 陈全胜, 等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报, 2008(1): 106-109.
 [5] 党宏社, 宋晋国, 郭琴. 基于 ARM 的嵌入式芒果大小检测与分级系统的实现[J]. 四川农业大学学报, 2011(1): 89-93.
 [6] 朱明, 陆小锋, 陆亨立, 等. AdaBoost 人脸检测算法在 DSP 上的移植与优化[J]. 计算机工程与应用, 2014(20): 197-201, 232.
 [7] 吕颖. DSP 图像数据的可视化[J]. 福建电脑, 2011(3): 153-155.

[8] 肖剑雄峰. 局部对比度增强的彩色图像灰度化参数化算法研究[D]. 温州: 温州大学, 2016: 9-16.
 [9] 姜小磊, 姚鸿勋, 赵思成. 一种极值约束的边缘保持图像平滑算法[J]. 计算机科学, 2014(10): 101-105, 127.
 [10] 张琪. 结合边缘检测的图像二值化算法[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 24-30.
 [11] 张建光, 李永霞. 基于拉普拉斯边缘检测算子的图像分割[J]. 福建电脑, 2011(7): 99, 101.
 [12] 周林妹. 数字图像边缘检测算法及其在农产品加工中的应用[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 139-142, 153.
 [13] 赵源萌, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于区域直方图统计的灰度图像色彩传递方法[J]. 北京理工大学学报, 2012(3): 322-326.
 [14] 范晔. 基于 DM6437 的车牌识别系统的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 61-62.
 [15] 杨方. 基于 TMS320C6678 的多核 DSP 并行处理应用技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014: 47-50.
 [16] 刘德方, 邓明, 陈海燕, 等. 基于 DM6437 和 VLIB 的 Canny 边缘检测[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2013(2): 72-75.
 [17] 黄震, 刘亚斌. TMS320C6000 系列 DSP 程序固化的研究[J]. 电子设计工程, 2016(12): 26-28, 32.