

基于FPGA的西瓜子机器视觉色选系统*

赵吉文 高 尚 魏正翠 汪 洋

(安徽大学电气工程与自动化学院, 合肥 230601)

【摘要】 基于现场可编程门阵列FPGA并行运算平台,设计了一种采用线阵CCD芯片的西瓜子色选机系统。硬件平台将CCD芯片驱动、动态图像的采集与处理、分类计算及气阀控制信号输出等集中在一个FPGA芯片上实现。色选机试制系统产量为1.2~1.8 t/h,色选精度97.7%,带出比为6~8。与传统工控机平台进行对比试验,验证了基于FPGA的西瓜子色选机系统具有良好的实时性和高效性。

关键词: 西瓜子 色选机 机器视觉 FPGA

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)08-0173-05

Design and Experiment of Watermelon Seed Machine Vision Inspection System Based on FPGA

Zhao Jiwen Gao Shang Wei Zhengcui Wang Yang

(School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract

A kind of watermelon seeds sorter system with linear CCD chip was designed based on the FPGA parallel computing platform. Through integrating CCD driver, dynamic image acquisition and processing algorithms, classification algorithm and valve control signal output in one FPGA chip, the hardware platform were designed. The color sorter prototype system had an output of 1.2 ~ 1.8 t/h, color sorting accuracy was 97.7%, ratio of color separation mass was 6 ~ 8. The good real-time and efficiency of the watermelon seeds sorter system based on FPGA were verified by the experiments that compared with the traditional industrial computer platform.

Key words Watermelon seed, Sorter, Machine vision, FPGA

引言

为保证炒制西瓜子的品质,炒制前对西瓜子进行分选是一个重要环节。人工分选效率较低,不能满足大规模生产需要,进而产生了自动分选瓜子物料机。色选机是瓜子分选机器的重要设备,采用线阵CCD技术的光电色选机因其分选效率高和准确性好而成为瓜子分选的主流设备。CCD色选机的核心技术为基于高速线阵CCD的数字图像处理技术和基于嵌入式系统的硬件实时处理技术,这也是该领域的研究热点问题。由于CCD色选机对实时性要求较高,其图像算法既要能够满足分类精度,又

要保证处理速度快,因此算法的复杂性必须和硬件资源相匹配。CCD色选机关键技术国内外学者均有成果报道^[1~5]。过于复杂的算法实时性欠缺,对硬件平台的要求也更高。为了提高分选的实时性,当前主要采用FPGA并行硬件处理技术^[6~7],但是该技术在色选机上的应用并不完善,需要进一步探讨。

本文基于甘肃会宁的新疆圆片西瓜子的颜色特征,设计西瓜子的灰度带比例分类识别算法,分析基于工控机处理平台的CCD色选机方案,并对FPGA并行硬件计算实现方案进行试验研究,对两种方案进行对比测试。

收稿日期: 2011-01-29 修回日期: 2011-03-16

* 安徽省自然科学基金资助项目(11040606M123)和安徽高校省级自然科学基金重点资助项目(KJ2011A012)

作者简介: 赵吉文,副教授,主要从事光电检测技术研究, E-mail: ustczjw@ustc.edu.cn

1 CCD 色选机结构

CCD 色选机由喂料器、滑道、光源、CCD 图像信号处理系统、气阀控制执行系统组成,如图 1 所示。

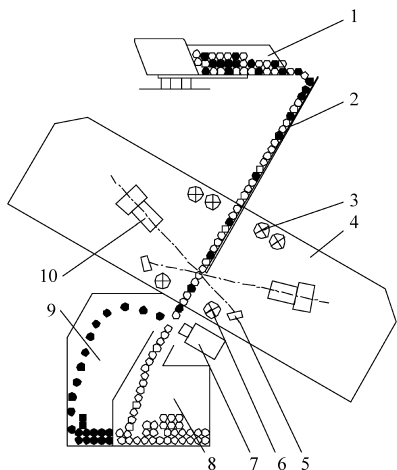


图 1 CCD 色选机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of CCD sorter

1. 喂料器 2. 滑道 3. 光源 4. 分选箱 5. 背景板 6. 补光灯
7. 气枪 8. 成品收集口 9. 废料口 10. CCD 图像信号处理系统

通过喂料器将待选物料均匀撒在滑道表面,单层物料沿滑道表面均匀下滑,经过线阵 CCD 相机的拍摄区域,CCD 相机捕获图像信号,并送入后继系统进行实时处理,由处理结果决定是否给出气阀的开阀信号,从而在废弃型物料滑过气阀口时将其吹入废料区。色选机设计的关键是:①物料经过拍摄区域的时间很短,一般为 10 ~ 30 ms,而后下落 30 ~ 40 ms 之后进入气枪口,因此要求图像处理过程能在约 50 ms 之内完成。②CCD 相机的拍摄角度、扫描速度必须和光源的角度及光通量相配合,才能保证拍摄的图像清晰可用。③为提高产量,色选机通常设计为多通道下料,单个 CCD 色选系统应能满足同时处理数十个通道的要求,即具有较高的并行处理能力^[8]。本文从 CCD 相机的硬件处理系统及图像算法两个方面实现该检测系统。

2 检测系统硬件平台设计方案比较

2.1 基于工控机平台的 CCD 检测系统

早期的 CCD 色选机通常由工控机平台(IPC)进行图像处理和控制在,其基本构成如图 2 所示。CCD 相机采集的信号经 PCI 采集卡传送到工控机,所有的信号采集、处理和信号输出均由工控机实现。软件开发平台为 Visual C++, CCD 相机采集到的物料图像信息经信号处理电路进行放大、隔离之后传送到工控机内 PCI 接口数据采集卡,利用 VC 编程功能进行实时处理并控制电磁气阀进行动作响

应。该硬件平台作为成熟硬件的简单集成,易于实现。早期用于分选算法的验证有一定的优势,但也有一系列的无法克服的问题:①每台色选机一般由 8 套左右的工控机系统组成,硬件系统结构庞大,不易集成于 CCD 色选机内部,降低了环境适应性,对色选机内部温升较为敏感,系统稳定性差,经常出现个别工控机死机等现象。②由于工控机为单线程串行工作方式运行,包含大量中断等待时间,因此运行效率受到牵制,甚至出现在线处理中数据丢失的现象,造成错判、误判。而分选工程实时性较强,各通道之间需要互不干扰的并行处理,因此探索并行检测处理系统非常迫切。

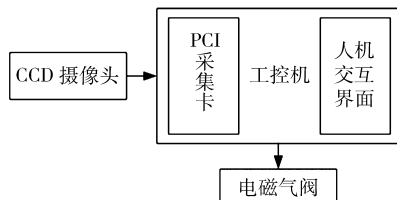


图 2 工控机色选机系统简图

Fig. 2 Diagram of sorter system based on IPC

2.2 基于 FPGA 的 CCD 检测系统

为提高系统实时性,在前期研究基础上设计了 FPGA 并行硬件计算平台。根据 CCD 色选机图像处理的计算规模,硬件核心部分采用 Altera Cyclone III 系列高性能 FPGA 作为主处理芯片,图像采集采用 TCD1208AP 型线阵 CCD。被测物体反射光线在线阵 CCD 的感光面上,线阵 CCD 在 FPGA 生成的一系列信号驱动下进行光电转换,并进行像素电荷转移和模拟信号输出。CCD 专用前端处理芯片在 FPGA 生成的时钟信号驱动下,对 CCD 输出的模拟信号进行相关双采样(CDS)和模数转换(ADC),所得数字信号又传回 FPGA;经 FPGA 内部 FIFO 存储器缓冲存储后,送入相应的图像处理逻辑电路部分进行计算;随后 FPGA 给出处理结果,并进行相应的阀门控制信号输出,在硬件平台上实现了线阵 CCD 高速图像检测。采用 FPGA 作为整个检测系统的核心进行数据采集、存储、处理和控制在,全部控制逻辑由硬件完成^[1],能同时达到精确性和实时性的要求,如图 3 所示。

综合比较两种检测系统硬件平台,工控机方案硬件系统支出较大,但实时性较差,对于简单的算法验证有一定作用,但用于产品机有一些问题;基于 FPGA 的 CCD 硬件系统并行工作,将数据采集、信息处理及控制信号输出集成到一个芯片上,系统结构简单,并行处理效率较高,是 CCD 色选机的较为合理的硬件处理系统。

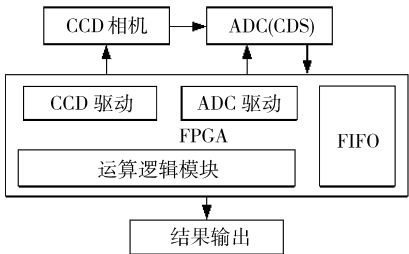


图 3 FPGA 硬件系统框图

Fig.3 Diagram of FPGA hardware system

3 FPGA 检测系统设计

针对图 3 所示的硬件系统原理要求,结合西瓜子图像处理、气阀控制信号输出及各模块之间的通信要求,分别对各个子模块进行设计。

(1)线阵 CCD 及其驱动

TCD1208AP 是高灵敏度线阵 CCD 传感器芯片,有 2 160 个有效像素点。图 4 为由 FPGA 生成 CCD 驱动信号的时序仿真图,其中 CLKIN_50M 和 RESETn 分别为系统主时钟和复位脉冲。OUT_SH 为光积分脉冲,OUT_halfM_1 和 OUT_halfM_2 为像素脉冲,两者互为反相,OUT_RS 为复位脉冲^[9]。

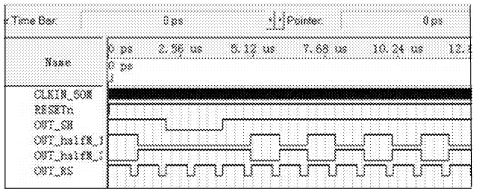


图 4 CCD 驱动时序仿真图

Fig.4 Diagram of simulation for CCD drive

(2)数据采集

线阵 CCD 输出的模拟信号中夹杂了若干种干扰噪声,如输出复位噪声、暗电流噪声等^[9]。采用 CCD 信号处理专用芯片所提供的相关双采样(CDS)和黑电平钳位补偿法可消除复位噪声和暗电流噪声。经过噪声消除后再进行模数转换,有效地提高了信号的信噪比和系统精度。

(3)FPGA 硬件平台

FPGA 的逻辑功能全部由硬件电路实现,运行速度快且管脚众多,易于连接大量外设来实现大规模系统,其内部逻辑程序可并行运行,具有处理复杂任务的能力。本系统以 VHDL 硬件描述语言编写各驱动时钟信号及图像处理算法程序,在 Quartus II 开发平台下进行编译、仿真、综合、布局布线及 FPGA 配置。

因系统工作频率较高,在试验电路板制作中要保证数字信号与模拟信号严格分离以降低干扰,并尽可能降低数字信号输出振铃以提高系统稳定性。

VHDL 程序编写中,通过统一线阵 CCD 和模数转换器的时钟时序减少了亚稳态的产生。

4 西瓜子图像处理算法

4.1 西瓜子灰度图像获取

通过对西瓜子原料的表面特征进行大样本统计,可以将瓜子分为正常瓜子、刀疤、烂瓜子、扭曲、半瓣头、白片、白皮、小颗粒等 8 种类型^[3],如图 5 所示。根据实际经验,只有正常瓜子符合人们的食用要求,其余类型均不符合。色选机的任务就是将除正常瓜子之外的其他 7 种瓜子(称为非正常瓜子)剔除。

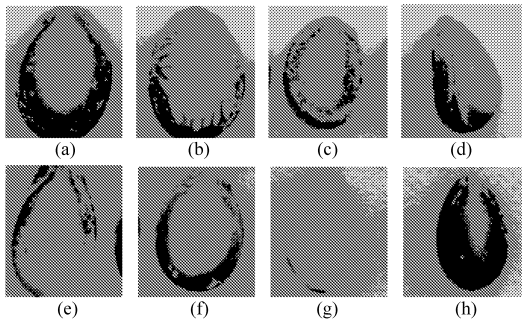


图 5 8 类西瓜子示意图

Fig.5 Image of eight categories watermelon seeds

- (a) 正常瓜子 (b) 刀疤瓜子 (c) 烂瓜子 (d) 扭曲瓜子
- (e) 半瓣头瓜子 (f) 白片瓜子 (g) 白皮瓜子 (h) 小颗粒瓜子

将待分选瓜子原料通过 CCD 色选机落料,得到瓜子落料图像如图 6 所示。

4.2 灰度带比例分类识别算法

采用对比度自适应的直方图均衡化对图像进行增强处理;将已知灰度概率密度分布的图像转换成具有均匀灰度概率密度分布的新图像^[10],以增加像素灰度值的动态范围,使图像整体对比度增强而变得清晰^[11~12]。增强后的图像需进行中值滤波和二值化处理,用邻域内像素灰度的中值来代替该像素的值,具有很好的边缘保护能力^[13],得到预处理图像如图 7 所示。

图 6 瓜子动态落料图像
Fig.6 Dynamic blanking images of seeds

用 Canny 算子提取瓜子轮廓^[14],如图 8 所示。将外轮廓线包围区域定义为单颗瓜子面积,记为 S_0 。内、外轮廓线所围成的环形区域定义为瓜子周围黑色区域的面积,记为 S_1 。内轮廓线所包围的区域定义为中部灰白区域的面积,记为 S_2 。灰度带比例定义为 $K = S_2 / S_1$ 。

以小颗粒瓜子为例,说明瓜子图像灰度带比例



图 7 二值化图像

图 8 瓜子图像的轮廓

Fig.7 Binary images

Fig.8 Profile of seeds image

计算过程,如图 9 所示。经对比度自适应的直方图均衡化、二值化、中值滤波等一系列图像处理之后,需通过计算面积来得到相应的灰度带比例^[15]。图中“计算面积”对应的 3 幅图像分别为:小颗粒瓜子的边界;瓜子中部白色区域取反后的图像(面积为 S_2);瓜子周围黑色区域的图像(面积为 S_1)。不同瓜子图形处理后所得各部分面积不同,因而 K 值不同,可作为区分瓜子类别的依据。

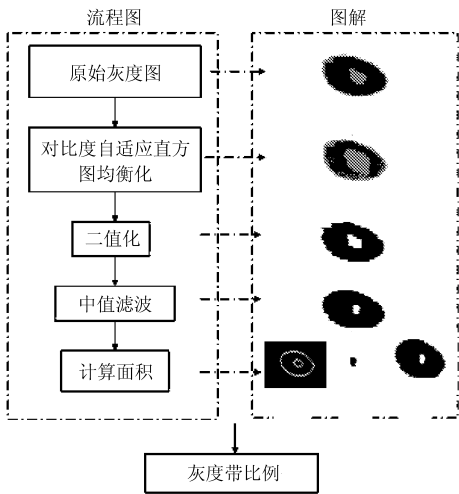


图 9 灰度带比例计算流程图与图解

Fig.9 Flow chart and diagram of gray scale extracting

根据人工分选经验,在色选机上分别对不同类型的瓜子进行大量灰度带比例的统计分析,如表 1 所示。

表 1 不同瓜子的灰度带比例训练结果

Tab.1 Training results of gray-scale of different seeds

瓜子类别	灰度带比例范围
正常瓜子	0. 21 ~ 0. 37
刀疤瓜子	0. 43 ~ 0. 92
烂瓜子	0. 12 ~ 0. 18
扭曲瓜子(高度扭曲)	0. 43 ~ 0. 61
半瓣头、白片瓜子	0. 67 ~ 4. 00
白皮瓜子	5. 67 ~ 99. 00
小颗粒瓜子	0 ~ 0. 099

统计结果表明:8 种类型的西瓜子的灰度带比例有较大的差异,虽有若干种非正常瓜子的灰度带比例范围相互重叠,但正常瓜子与其他各非正常瓜子的灰度带比例范围均无重叠,因此不影响正常瓜子与非正常瓜子的区分。需要说明的是,扭曲程度不高的瓜子其灰度带比例会与正常瓜子比例区间重

叠,此时不能识别出其是正常瓜子与扭曲瓜子,但是,在实际生产中扭曲程度不高的瓜子可以当作正常瓜子看待,不影响实际生产效果。

在色选过程中,将经算法处理得到瓜子的灰度带比例数据与正常瓜子的比例数据进行比较,如落入正常瓜子的比例范围,则可认为该瓜子为正常瓜子,不给出气枪打开信号;否则视为非正常瓜子,给出相应的信号控制,气枪在特定延时时间之后将掠过的瓜子吹入废料口。

5 检测系统对比测试

为了检验硬件系统的实际分选效率和性能,分别用工控机系统和 FPGA 系统搭建了样机平台,该样机平台机械系统、光源系统及辅助电路系统相同,仅数据采集和处理系统有区别。通过可兼容的电气、机械接口分别连接原工控机的采集处理系统与 FPGA 系统进行对比测试。

首先对样机进行实际分选测试,进行算法有效性验证。将非正常瓜子单颗连续投入系统,气枪能够在极短的响应时间内将其准确吹出,说明图像处理及气阀响应能够满足实时性要求。这得益于高速线阵 CCD 的高扫描速度以及灰度带比例分类识别算法的高效性。

5.1 试验性能对比

两套系统采用同样的分选算法,其中工控机系统采用 VC 进行编程实现,而 FPGA 系统采用 VHDL 编程实现。试验样机工作流程如图 10 所示。

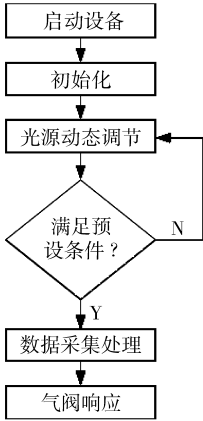


图 10 CCD 色选机系统流程图

Fig.10 System flow chart of CCD sorter

通过试验发现,工控机机型存在如下问题:①工控机色选机整台需要 8 套工控机及采集卡,系统复杂,占用了大量的机器空间,且温升过高,长时间运行后出现部分工控机死机。②工控机操作系统采用 WINCE 实现,在计算机时序控制上较难实现一致性,且在突然断电时,每台工控机启动时间不一致,

出现色选机整机系统自检过长的现象。③当瓜子流量较大时,采集系统出现不规则的图像数据丢失,造成了间歇性误判,从而使分选成功率出现随机的波动。

经与工控机系统试验比较,FPGA 检测系统有如下优点:①FPGA 系统中的算法采用 VHDL 逻辑语言进行描述,易于硬件实现,采用针对所选器件型号进行了优化的运算 IP 核并在一个 FPGA 芯片中放置多个 IP 核,实现了高速并行计算。②通过片内 RAM 构建大容量 FIFO 存储器锁存中间结果,使图像获取、运算等操作协调一致,乘法运算以两级流水线工作方式实现,在最大限度节约 FPGA 资源的同时,实现了高速处理。③在一个 FPGA 上实现 CCD 驱动、信号采集、预处理、分类计算、控制信号输出的一体化。整个硬件检测系统体积只有 50 mm × 50 mm × 100 mm,和工控机系统相比大大节省了机内空间,温升较小,长时间运行系统稳定性较好。④系统采用嵌入式平台,时序控制、各通道之间一致性参数调整易于实现。

5.2 试验参数比较

将试验样机分别装上不同的检测系统,进行分选参数对比。试验样机照明系统采用自适应可调高亮度 LED 灯照明。通过振动器喂料,检测系统对瓜

子图像处理之后,输出气阀信号驱动电磁阀控制气枪将非正常瓜子吹出。滑道为 U 型,通道数均为 120,为提高分选的成功率,其中 80 个通道用于一次分选,40 个通道用于二次分选。

取 0.5 t 西瓜子为测试样本,经过前期手工分选并进行结果统计知,样本中非正常瓜子质量分数约为 8%。对比测试重点考察色选精度、产量和带出比。色选精度是指对瓜子进行色选后得到正常瓜子的质量分数。产量指色选机单位时间内处理的物料质量。带出比是指经色选后进入废料口的非正常瓜子与正常瓜子质量之比。

经反复测试,FPGA 机型对 0.5 t 样本色选完毕耗时 16 ~ 25 min,产量为 1.2 ~ 1.8 t/h,色选精度为 97.7%,带出比为 6 ~ 8;工控机机型完成同样质量色选任务耗时 27 ~ 33 min,产量为 0.9 ~ 1.1 t/h,色选精度为 94.5%,带出比为 3 ~ 4。

6 结束语

通过对基于工控机和 FPGA 的瓜子检测系统进行对比分析,深入研究了两种硬件系统对西瓜子 CCD 色选机性能的影响,提出了基于 FPGA 的西瓜子分选系统的设计方案,并通过试验对比,验证了 FPGA 分选系统的可行性。

参 考 文 献

- 1 Tom Pearson. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 12 ~ 18.
- 2 Abbasgholipour M. Color image segmentation with genetic algorithm in a raisin sorting system based on machine vision in variable conditions [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3 671 ~ 3 678.
- 3 周一红. 西瓜子智能识别系统核心技术与实现 [D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
Zhou Yihong. Research and application on core technology for intelligent recognition system of watermelon seeds [D]. Suzhou: Suzhou University, 2007. (in Chinese)
- 4 管森, 孙涌, 杨峰, 等. 西瓜子自动分选系统核心特征提取算法的研究及应用 [J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(3): 91 ~ 93.
Guan Miao, Sun Yong, Yang Feng, et al. Research and application of core characteristic extraction algorithm for auto-separating system of watermelon seeds [J]. Computer Application and Software, 2008, 25(3): 91 ~ 93. (in Chinese)
- 5 李昊宇, 李伟, 徐小波, 等. 基于光度立体法的翘板黑瓜子识别方法研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 159 ~ 163.
Li Haoyu, Li Wei, Xu Xiaobo, et al. Method for identification of wrinkled black melon seeds using photometric stereo [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(5): 159 ~ 163. (in Chinese)
- 6 Yuanpao Hsu, Hsiao-chun Miao, Ching-chih Tsai. FPGA implementation of a real-time image tracking system [C] // Proceedings of SICE Annual Conference, 2010: 2 878 ~ 2 884.
- 7 Xu Guosheng. The study on real-time data processing based on CCD scanning and detecting device on FPGA [C] // IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009: 81 ~ 84.
- 8 刘德瑞. 基于 CCD 的高速色选机光机系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
Liu Derui. Research for CCD-based high-speed color sorter-ray system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- 9 Toshiba Corporation. Data sheet: Toshiba CCD linear image sensor TCD1208AP [CP]. Toshiba Corporation, 1997.

- 6 冯斌,汪懋华. 计算机视觉技术识别水果缺陷的一种新方法[J]. 中国农业大学学报,2002,7(4):73~76.
Feng Bin, Wang Maohua. Study on identifying measurement about default of fruit in computer vision[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(4): 73~76. (in Chinese)
- 7 付峰,应义斌. 球体图像灰度变换模型及其在柑桔图像校正中的应用[J]. 农业工程学报,2004,20(4):117~120.
Fu Feng, Ying Yibin. Gray level transform model of ball image and its application in citrus image correction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 117~120. (in Chinese)
- 8 应义斌,付峰. 水果品质机器视觉检测中的图像颜色变换模型[J]. 农业机械学报,2004,35(1):85~89.
Ying Yibin, Fu Feng. Color transformation model of fruit image in process of non-destructive quality inspection based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 85~89. (in Chinese)
- 9 Gómez-Sanchis J, Moltó E, Camps-Valls G, et al. Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(1):80~86.
- 10 Wen Z, Tao Y. Dual-camera NIR/MIR imaging for stem-end/calyx identification in apple detect sorting [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(2): 449~452.
- 11 Aleixos N, Blasco J, Navarrón F, et al. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002,33(2): 121~137.
- 12 Kleynen O, Leemans V, Destain M F. Development of a multi-spectral vision system for the detection of defects on apples [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(1): 41~49.
- 13 赵杰文,刘文彬,邹小波. 基于三摄像系统的苹果缺陷快速识别[J]. 江苏大学学报,2006,27(6):287~290.
Zhao Jiewen, Liu Wenbin, Zou Xiaobo. Fast identification of apple defect based on three imaging system[J]. Journal of Jiangsu University, 2006, 27(6): 287~290. (in Chinese)
- 14 庞江伟. 基于计算机视觉的脐橙表面常见缺陷种类识别的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
Pang Jiangwei. Study on external defects classification of navel orange based on machine vision[D]. Hangzhou: Zhengjiang University, 2006. (in Chinese)
- 15 李江波,饶秀勤,应义斌,等. 基于掩模及边缘灰度补偿算法的脐橙背景及表面缺陷分割[J]. 农业工程学报,2009,25(12):133~137.
Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Background and external defects segmentation of navel orange based on mask and edge gray value compensation algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 133~137. (in Chinese)
- 16 李江波,饶秀勤,应义斌,等. 基于高光谱成像技术检测脐橙溃疡[J]. 农业工程学报,2010,26(8):222~228.
Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Detection of navel oranges canker based on hyperspectral imaging technology [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(8):222~228. (in Chinese)

(上接第 177 页)

- 10 Kwok N M, Jia X, Wang D, et al. Image contrast enhancement based on histogram smoothing and continuous intensity relocation[C]//Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress, 2010,2: 1~5.
- 11 Sengee N, Sengee A, Heung Kook Choi. Image contrast enhancement using bi-histogram equalization with neighborhood metrics[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2 727~2 734.
- 12 Chen Hee Ooi, Isa N A M. Quadrants dynamic histogram equalization for contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56(4): 2 552~2 559.
- 13 Akkoul S, Ledee R, Leconge R, et al. A new adaptive switching median filter[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2010, 17(6): 587~590.
- 14 Wang Xiao, Xue Hui. An improved canny edge detection algorithm based on predisposal method for image corrupted by Gaussian noise[C]//World Automation Congress (WAC) IEEE Conferences, 2010: 113.
- 15 洪英,党宏社,宋晋国. 基于图像处理的不规则形体表面积测量方法[J]. 计算机测量与控制,2009,17(19):1 679~1 681.
Hong Ying, Dang Hongshe, Song Jinguo. Method for irregular solid surface area measurement based on image processing [J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(19):1 679~1 681. (in Chinese)