

田间果蔬采摘机器人视觉传感器设计与试验\*

李理<sup>1,2</sup> 殷国富<sup>1</sup> 刘柯岐<sup>2</sup>

(1. 四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065; 2. 西南科技大学计算机科学与技术学院, 绵阳 621010)

**【摘要】** 针对田间果蔬采摘机器视觉识别与定位的需求,设计嵌入式采摘视觉传感器,内嵌130万像素CMOS图像传感器和开放性MCU,配置亮度处理模块和室外光自适应控制专家库,解决室外光变化影响视觉检测的难题。用主从传感器构造双目视觉系统,配置图像分割和测距算法,进行采摘目标的识别与定位。经试验和测试,在采摘臂长范围内,对成熟西红柿的识别有效率为96%,位置误差±12 mm。

**关键词:** 果蔬 采摘机器人 视觉传感器 目标识别与定位 双目视觉系统

**中图分类号:** TP242.6<sup>+</sup>2; S225.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0152-06

Design and Experiments of Vision Sensor for Harvest Robots in Field

Li Li<sup>1,2</sup> Yin Guofu<sup>1</sup> Liu Keqi<sup>2</sup>

(1. School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. School of Computer Science and Technology, Southwest Science & Technology University, Mianyang 621010, China)

Abstract

Aimed at the demand of recognition and location in computer vision for harvest robots, the embedded vision sensor plat was designed which contained 1.3 million pixel CMOS image chip, MCU with open structure, and brightness-adapting module controlled by the expert database to solve the problem of outdoor light changing which affected the visual inspection. Two sensors were used to construct binocular vision sensor system which was coordinated by master-slave frame. The algorithm of image segmentation and distance measurement was applied to get the location data of harvesting object. The binocular vision sensor system ran smoothly and reliably. The performance test results showed that the success ratio of identifying is 96% and the measure error is within ±12 mm when the system took ripe tomato as an measuring object and the measure distance limits was in machine pick-arm range.

**Key words** Fruits and vegetables, Harvest robots, Vision sensor, Target recognition positioning, Binocular vision sensor system

引言

提高果蔬的采摘效率和质量、实现采摘机械化是农业现代化发展的重要方向<sup>[1]</sup>。采摘机器人的视觉技术,是机器采摘的核心技术,也是目前研究开发、技术创新的重点和难点。采摘机器人的视觉技术,受典型视觉结构系统的局限,一直采用相机+PC机+图像采集卡+算法的模式。这一系统需要

PC机介入作为处理和控制平台,结构复杂、成本高、实时性差,不能满足采摘机器人发展的需求<sup>[2~11]</sup>。为此本文设计针对田间采摘机器人的智能视觉传感器,以解决果蔬目标的识别和定位两项主要任务。

1 采摘视觉传感器组成

采摘视觉传感器以高性能的嵌入式MCU处理

收稿日期: 2009-07-29 修回日期: 2009-09-12

\* 国家科技重大专项(2009VX04001-023)

作者简介: 李理, 博士生, 西南科技大学讲师, 主要从事机器视觉技术研究, E-mail: lli2000@163.com

通讯作者: 殷国富, 教授, 博士生导师, 主要从事制造业信息化技术与应用研究, E-mail: ying821201@163.com

器和 CMOS 图像芯片为核心,集相机和 PC 机视觉功能为一体,构成嵌入式视觉小系统。其设计和选型上突出了以直接总线为纽带连接 CPU 和 CMOS 的特点:图形数据通过 DMA 传输到处理器,不占用 CPU 资源,速度快,访问控制简捷。采摘视觉传感器配有大容量内存,64MB 高速 SDRAM 和 64MB 非易失内存 FLASH,能嵌入操作系统,方便实现复杂视觉算法。配置的多种通信接口,使其具有很强的通信能力。设计的采摘视觉传感器结构清晰、性价比高,其结构如图 1 所示。

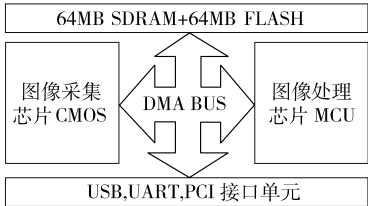


图 1 传感器结构框图

Fig.1 Diagram of vision sensor structure

采摘视觉传感器基于底层芯片直接开发设计,可以充分发掘 CMOS 图像芯片的性能。针对田间采摘环境变化大,室外光影响因素多的机器视觉技术共性难题,在设计中开发了室外光自适应模块,即开放 CMOS 图像芯片的亮度、白平衡、曝光时间等控制寄存器,采用自动和外调控二维模式,分段调整和处理 CMOS 图像芯片的控制寄存器设置,增强了采摘视觉传感器的室外光适应能力,在果蔬目标的成像质量上有显著提高。

用主从双视觉传感器构成双目识别和定位系统,如图 2 所示。双视觉传感器实现双目识别和定位,体现了分布式控制理念,并行处理图像算法,有更好的快速性和可靠性。

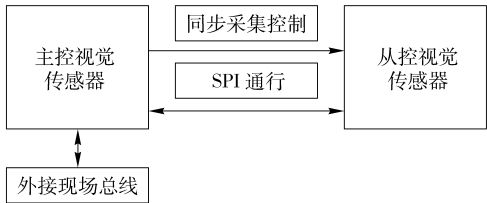


图 2 主从双目视觉传感器系统示意图

Fig.2 Diagram of binocular vision sensor system

主、从双视觉传感器的协调工作是通过两个传感器之间的同步采集线控制管理,两个传感器之间的数据传输通过 SPI 总线实现,可方便地构成多视觉传感器的多目系统。

本文设计的采摘视觉传感器有 3 个鲜明特点:以嵌入式结构技术集成相机和处理机;增强传感器室外光自适应能力;用主从双视觉传感器实现目标识别和定位任务。

## 2 关键技术开发与实现

### 2.1 嵌入式视觉传感器设计

构成视觉传感器的核心处理器选用基于 32 bit RISC 处理器结构的 ARM9 芯片 S3C2440,系统稳定运行在 400 MHz,最高可达 533 MHz;配置 64 MB 的 SDRAM,由两片 K4S561632 组成,工作在 32 bit 模式下;配置 64 MB NAND FLASH,采用的 K9F1208 可以兼容 16 MB、32 MB 或 128 MB 数据块读写。ARM S3C2440 内置多种事件处理和通信接口,可以简化系统的硬件设计。S3C2440 还内置了功能强大的相机接口,支持 ITU-RBT601/656 8-bit 模式。最大支持 4 096 × 4 096 像素输入(支持 2 048 × 2 048 像素输入缩放),具有 DZI 数字变焦能力、镜头旋转能力,相机输出格式有 8/24-bit 的 RGB 与 YCbCr 4:2:2 两种格式,有极性可编程视频同步信号,能直接与 CMOS 图像芯片接口,构成高性能视觉传感器,如图 3 所示。

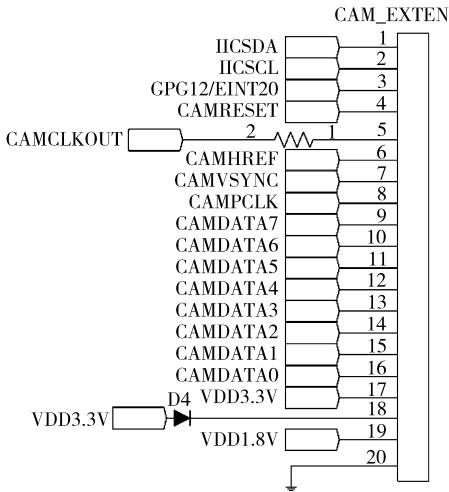


图 3 S3C2440 与 CMOS 图像芯片接口

Fig.3 Interface of S3C2440 to CMOS

视觉传感器的光电图像部件采用 OMNIVISION 的 CMOS 图像芯片 OV9660,像素点为 3.18  $\mu\text{m}$  × 3.18  $\mu\text{m}$ ,数组 1 300 × 1 028 像素,直接输出多种格式的 8 位数据,支持 8 bit RGB 与 YCbCr 4:2:2 两种格式,与 S3C2440 处理器的相机接口匹配。OV9660 不仅具有 130 万像素分辨率,而且图像采集控制功能强,开放度高。亮度、白平衡、曝光时间等控制寄存器和数据寄存器能进行软件读写设置,有自动和外调控(手动)两种模式,为室外光变化调整提供了硬件基础。视觉传感器的光电图像部件可以根据像素分辨率应用需求,选择 30 万至 500 万像素的 CMOS 图像芯片,OMNIVISION 提供上述系列的 CMOS 图像芯片供选用。

嵌入式视觉传感器配置易用和开放的软件平

台,便于移植和开发各种机器视觉的应用程序。设计中使用了两种开放性的平台:ADS RISC + C 混合编程平台和嵌入式 Linux 平台。混合编程平台使用汇编指令 + C 语言的指令模式,简单、快捷,能最大程度地发挥传感器的硬件性能。嵌入式 Linux 平台是一个完善的操作系统,使用成熟的 ARM GCC 交叉编译环境。本文开发的设备驱动程序可实现 CMOS 的采集、图像传输、DMA 存取等控制功能。图像处理算法在两种平台下均可方便使用 C 代码实现。

2.2 室外光自适应模块设计

在视觉传感器中设计室外光自适应模块,是解决室外光变化影响视觉检测难题的一种技术措施。室外光自适应模块直接基于 CMOS 图像芯片内的亮度、白平衡、曝光时间等相关寄存器进行设置控制,不增加硬件设计,符合以软代硬的现代思维。

对室外光强的检测,不需要另设光敏器件,通过软件读取 CMOS 图像芯片内的亮度数据寄存器的数值,可检测到真实可靠的光强值,是室外光自适应处理的依据。自适应模块采用自动和外调控二维模式,分段调整和处理 CMOS 图像芯片的控制寄存器设置,即把获取的光强数据分成自动和外调控两个控制段,如 8 位光强数值以 16 进制值 96 H 分为两段,96 H 内为自动控制,大于 96 H 为外调控段。采摘视觉传感器的亮度分段是在开机和规定时间才进行,不会造成系统负担。在自动调整段只需要把 CMOS 芯片内的亮度、白平衡、曝光时间等相关寄存器设置成自动模式,由 CMOS 芯片自取光强适应值。外调控段的自适应处理比较复杂,室外光噪声影响视觉检测的诸多问题主要出现在这个阶段,本文基于专家控制实现外调控段的室外光自适应处理。

针对外调控段室外光强变化的非线性、模型不确定和控制目标要求,研制了基于专家控制的自适应处理算法,通过定性分析抽取控制规则,结合实际室外光手动调整过程经验,进行参数调整,建立专家控制的知识库。在控制变量的选取上,将亮度偏差量化为 7 个等级,  $E = \{E_{N1}, E_{N2}, \dots, E_{N7}\}$ , 即设定差值的正负大小 7 个级别。将曝光时差量化为 5 个等级  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_5\}$ , 白平衡  $W$  调整 3 个量级,  $W = \{W_1, W_2, W_3\}$ 。以室外光强值与目标值的差值为条件,决策输出亮度、白平衡、曝光时间寄存器的调整设置值。取值公式为

$$\beta = \begin{cases} 1 - \frac{0.5H}{200} & (200 < H < 255) \\ 1.5 - \frac{0.5H}{150} & (150 < H < 200) \\ 1 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中  $H$ ——室外光强数据

通过偏差量化,选取控制变量,总结控制规则,确定判别算式,计算整定数据,改变寄存器设置,实现室外光自适应处理。

2.3 主从双目识别和定位设计

主从双目采摘视觉系统由置于机器人机架上的两个带相同镜头的视觉传感器左右布置组成,光轴平行,高度一致,同时拍摄同一个场景的图像。分辨率 1 300 × 1 028 像素,输出 YCbCr 4:2:2 图像格式。两个视觉传感器之间的位置关系、内部参数、外部参数(旋转矩阵和平移向量)用立体视觉软件预先进行标定。

计算目标点深度值的模型<sup>[12~13]</sup>如图 4 所示,  $f$  为相机的焦距,  $b$  为主从两视觉传感器的中心距离,  $R$  为目标点的深度值,  $X_L$  和  $X_R$  分别是目标点在左右图中的位置。目标点在立体图像对中的视差为其在两图中水平方向上的视差  $D = X_L - X_R$ 。

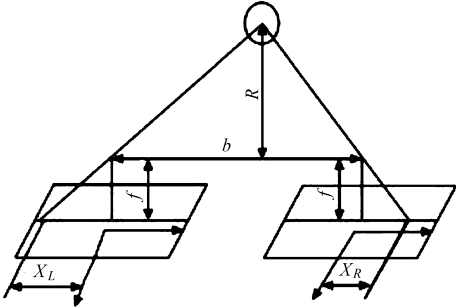


图 4 目标点深度测量计算模型

Fig. 4 Math model of depth measurement for object point

根据三角测量原理,可获得深度值  $R$  与视差  $D$  的关系为

$$R = \frac{bf}{D}$$

通过对左右两图像进行图像分割,获取目标对象在主从图像对中的形心坐标,采用形心匹配方法进行目标对象的初步定位。计算得到目标对象的初步深度值。再由目标果实的最小外接矩形进行区域匹配,通过区域匹配算法进一步确定目标表面点的位置,更加准确地获得目标对象的位置信息。

主从双目采摘视觉系统的功能结构如图 5 所

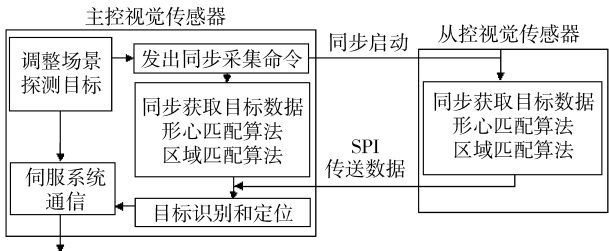


图 5 主从双视觉传感器识别和定位功能图

Fig. 5 Working diagram for master-slave binocular vision sensor system

示。主控视觉传感器承担调整场景、探测目标,执行指挥主从双目同步获取目标数据以及与采摘机器人伺服系统通信三重任务。从控视觉传感器主要与主机同步获取目标数据,进行形心匹配与区域匹配,并通过高速 SPI 向主机传送预处理数据,协调计算目标对象的位置信息。主从结构双视觉传感器识别和定位系统简化了多相机 + PC 机 + 多图像采集卡 + 算法的视觉系统模式,目标识别和定位速度加快,集成安装更快捷,性价比更高。软件设计流程如图 6 所示。

3 视觉传感器性能试验

3.1 室外光照适应性测试

为了测试采摘视觉传感器对室外光照的适应能力,在光照实验的环境选择上,直接面对田间西红柿采摘的真实状态。当地 5 ~ 7 月是西红柿收获旺季,晴天 10:00 ~ 16:00 是光照强烈变化时段,也是采摘作业必须面对的时段,在该时段进行了不同日期不同时间 50 次以上的光照自动和自适应外调控二维模式对比试验,其有效识别率达到 96% 。

光照试验直接使用本文研制的采摘视觉传感器,但增加了试验的开关和功能软件,即能够方便上传 RGB 图形数据、自动模式的 Y、Cr 分量图数据、自适应模式的 Y、Cr 分量图数据<sup>[14]</sup>(西红柿识别在 YCbCr 图像空间),为后续分析处理提供条件。

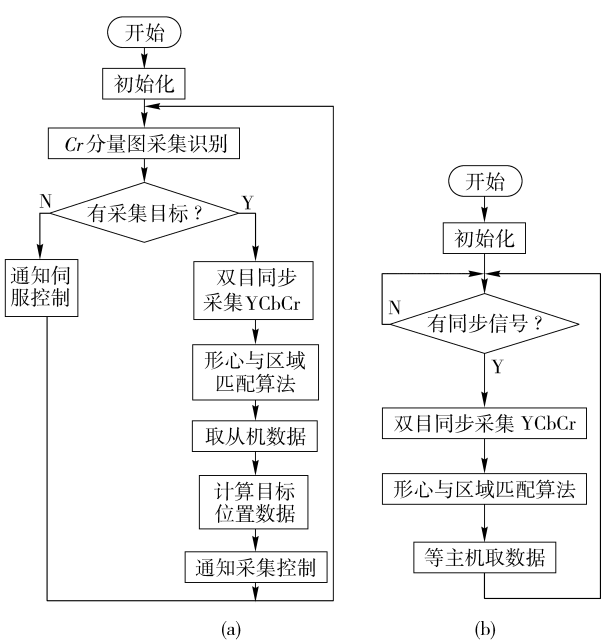


图 6 软件流程图

Fig. 6 Flow chart of the software design

(a) 主采摘视觉系统 (b) 从采摘视觉系统

图 7 ~ 9 是选择不同日期的 10:00、12:00、15:00 三个时间光照试验的典型图形数据。

从上述图形和数据分析表明,视觉传感器的室外光自适应模块可以改善强光照下成像效果,在 Cr 分量图上,提高了分辨率,利于目标识别。两种模式的亮度直方图看出,有明显的改变。

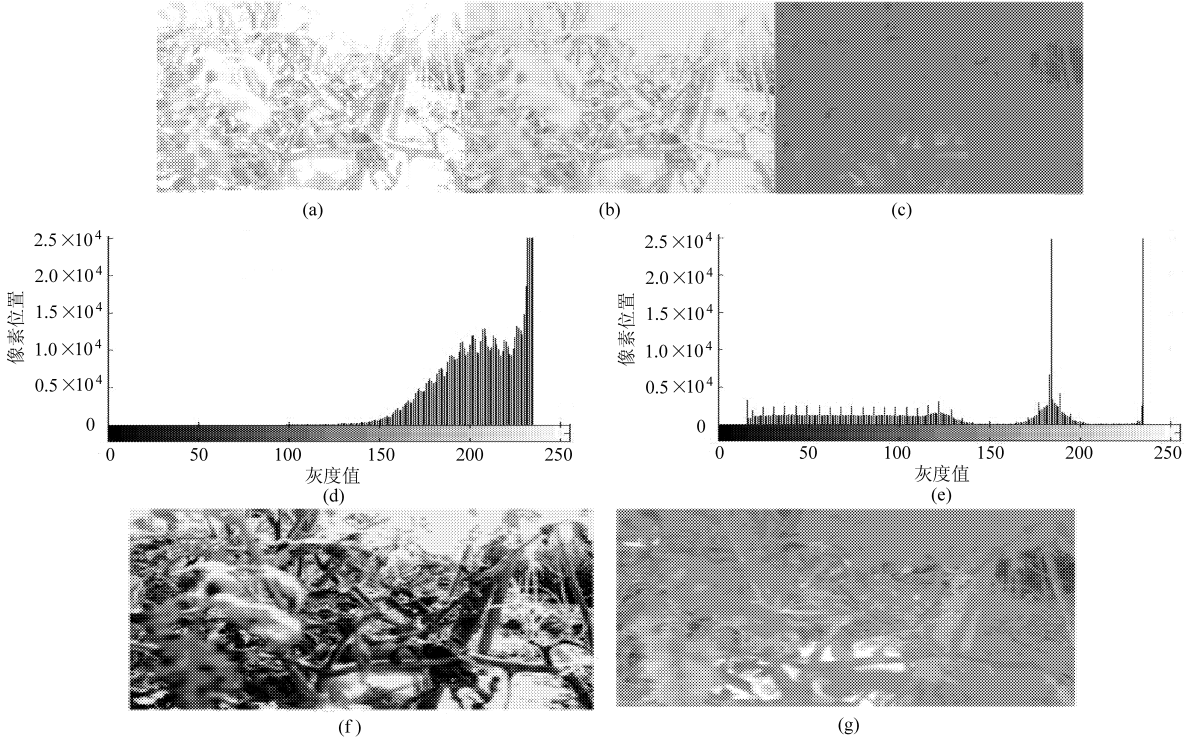


图 7 10:00 光照试验图形数据

Fig. 7 10:00 AM light experiment graphic data of field tomato

(a) 自动模式 RGB 图 (b) 自动模式 Y 图 (c) 自动模式 Cr 图 (d) 自动模式直方图 (e) 自适应模式直方图 (f) 自适应模式 Y 图 (g) 自适应模式 Cr 图

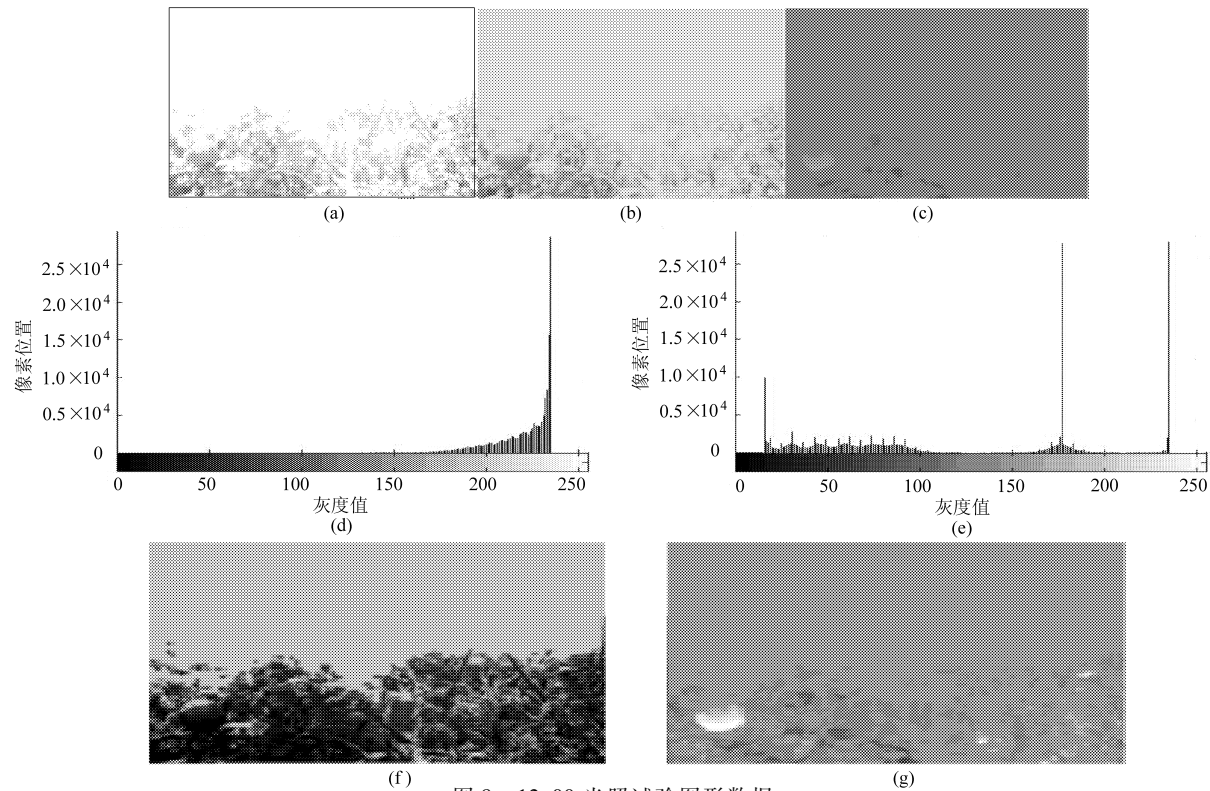


图 8 12:00 光照试验图形数据

Fig. 8 12:00 AM light experiment graphic data of field tomato

(a) 自动模式 RGB 图 (b) 自动模式 Y 图 (c) 自动模式 Cr 图 (d) 自动模式直方图 (e) 自适应模式直方图 (f) 自适应模式 Y 图 (g) 自适应模式 Cr 图

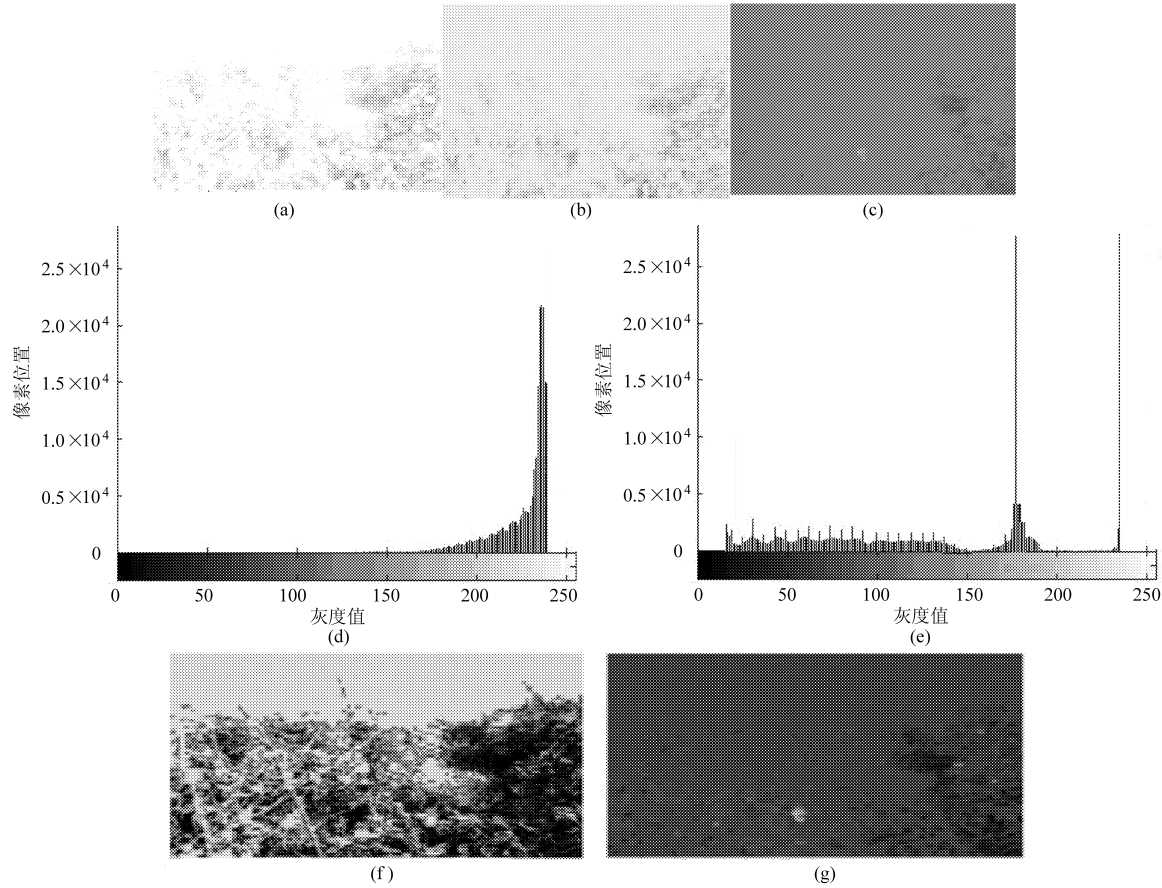


图 9 15:00 光照试验图形数据

Fig. 9 15:00 PM light experiment graphic data of field tomato

(a) 自动模式 RGB 图 (b) 自动模式 Y 图 (c) 自动模式 Cr 图 (d) 自动模式直方图 (e) 自适应模式直方图 (f) 自适应模式 Y 图 (g) 自适应模式 Cr 图

3.2 目标定位测试

设计了主从双目识别定位试验机构,两个视觉传感器左右布置,光轴平行,机构有稳定的脚架,能 270°水平旋转,90°上下移动,方便在实验室和田间作测试。

主要对西红柿进行识别定位试验,采摘臂长在 500 mm 内,视角 72°,双目水平间距在 150 ~ 300 mm 可调,景深 2 m。视觉传感器选择国产工业镜头,不但能满足光学条件,成像畸变小,性价比高,也容易实现两个相机的参数一致性调整。进行相机标定后,即可获得焦距  $f$  数据。

进行室内测试的目标是布置的静物西红柿,主从双目图像采集,  $Cr$  图形空间目标识别, 特征匹配,三角法计算深度。有了深度数据,位置的三维坐标即可确定,故重点测试深度。资料及分析如表 1 所示。

表 1 深度资料表(中心距 300 mm)  
Tab.1 Table of depth data

| 左图像素 | 右图像素  | 计算深度/mm | 测试深度/mm | 误差/mm |
|------|-------|---------|---------|-------|
| 99   | - 54  | 459. 3  | 460     | 0. 7  |
| 121  | - 83  | 348. 3  | 350     | 1. 7  |
| 106  | - 112 | 321. 4  | 320     | 1. 4  |
| 53   | - 83  | 517. 5  | 520     | 2. 5  |

本文还进行了田间西红柿识别定位试验。由于试验重点在于检验采摘视觉传感器的成像与处理效果,故选择田间无遮挡西红柿作为对象。

对不同位置的田间西红柿定位深度测试结果如图 10 所示,表中横坐标是测量距离,纵坐标是根据计算得到的距离与测量距离之间的偏差,单位都是 mm。

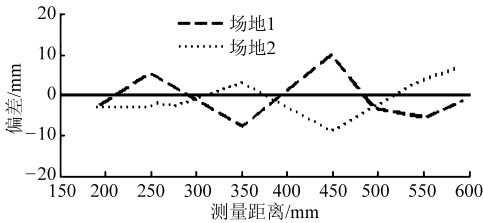


图 10 田间西红柿深度定位试验结果

Fig. 10 Test result of depth location of field tomatoes

从图 10 可以看出,当工作距离小于 500 mm 时,误差基本都在 ±12 mm 以内。

4 结论

(1) 以高性能的嵌入式 MCU 处理器和 CMOS 图像芯片为核心,集相机和 PC 机视觉功能为一体,构成嵌入式视觉小系统,提供开放性的硬、软件平台和高速数据接口,性价比高,可方便地应用于各类农业采摘机器。

(2) 通过对 CMOS 芯片的底层控制实现亮度自适应功能,较好地解决了在室外采集时的强、弱光干扰问题,为快速地阈值分割和图像后期处理提供了有利条件。

(3) 使用系统主从模式构造双目视觉采集定位系统,能实现多传感器、多视角的协调采集和数据处理。

参 考 文 献

1 Kondo N, Nincomiya K, Hayashi S, et al. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture[C] //2005 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper No. 053138.

2 Tom Pearson. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009,69(1): 12 ~ 18.

3 Kanae Tanigaki, Tateshi Fujiura, Akira Akase, et al. Cherry-harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008,63(1): 65 ~ 72.

4 Hiroshi Okamoto, Won Suk Lee. Green citrus detection using hyperspectral imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009,66(2): 201 ~ 208.

5 Bulanon D M, Kataoka T, Ukamoto H, et al. Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot [C] //SICE Annual Conference, Sapporo, 2004.

6 Seiichi Inoue, Takahiro Kobayashi, Takeo Ojika, et al. Machine intelligent system techniques for automatic harvest systems [J]. Expert Systems, 2002, 2:909 ~ 935.

7 Thomas Rath, Marco Kawollek . Robotic harvesting of Gerbera Jamesonii based on detection and three-dimensional modeling of cut flower pedicels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1): 85 ~ 92.

8 Paul Boissard, Vincent Martin, Sabine Moisan. A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 62(2): 81 ~ 83.

9 Hannan M W, Burks T F, Bulanon D M. A real-time machine vision algorithm for robotic citrus harvesting[C] // 2007 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper No. 073125.

(下转第 136 页)

- 2 王玲,籍保平.龙眼多糖结构和性质的研究[J].食品研究与开发,2006,27(10):23~27.  
Wang Ling, Ji Baoping. Study on structure and characteristic for longan polysaccharide [J]. Food Research and Development, 2006, 27(10): 23~27. (in Chinese)
- 3 Yang C X, He N, Ling X P, et al. The isolation and characterization of polysaccharides from longan pulp [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63(1): 226~230.
- 4 郑少泉,姜帆,高慧颖,等.超声波法提取龙眼多糖工艺研究[J].中国食品学报,2008,8(2):76~79.  
Zheng Shaoquan, Jiang Fan, Gao Huiying, et al. Study on the ultrasonic extraction of longan polysaccharide [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008, 8(2): 76~79. (in Chinese)
- 5 王统一,赵兵,王玉春.正交试验-人工神经网络模型优化龙眼多糖的超声提取工艺[J].中草药,2006,37(10):1 514~1 516.
- 6 王玲,籍保平.龙眼粗多糖提取的影响因素及工艺的研究[J].现代食品科技,2006,22(3):53~56.  
Wang Ling, Ji Baoping. Study on the extraction technology of polysaccharide from longan [J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(3): 53~56. (in Chinese)
- 7 杨翠娟,李清彪,凌雪萍,等.应用微波前处理-热水浸提技术提取龙眼多糖[J].化工学报,2007,58(8):2 004~2 009.  
Yang Cuixian, Li Qingbiao, Ling Xueping, et al. Hot water extraction of longan polysaccharide assisted by microwave pretreatment [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(8): 2 004~2 009. (in Chinese)
- 8 张惟杰.糖复合物生化研究技术[M].杭州:浙江大学出版社,1998:10~11.
- 9 袁志发,周静芋.试验设计与分析[M].北京:高等教育出版社,2000:381.
- 10 刘富梁,金卫根,梁华正,等.酶法在中药提取中的研究进展[J].时珍国医国药,2006,17(7):1 152~1 153.  
Liu Fuliang, Jin Weigen, Liang Huazheng, et al. Advances on application of enzyme to extraction of Chinese native medicine[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2006, 17(7): 1 152~1 153. (in Chinese)
- 11 聂凌鸿.淮山活性多糖的分离纯化、结构与生物活性的研究[D].广州:华南理工大学,2004.  
Nie Linghong. Study on isolation, purification, structure and biological activity of active polysaccharides from *Dioscorea Fordii Prain et Burkill* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 12 王兆梅,李琳,郭祀远,等.活性多糖构效关系研究评述[J].现代化工,2002,22(8):18~22.  
Wang Zhaomei, Li Lin, Guo Qiyuan, et al. Review on structure-activity relationship of active polysaccharides [J]. Modern Chemical Industry, 2002, 22(8): 18~22. (in Chinese)
- 13 孙群,阚健全,赵国华,等.活性多糖构效关系研究进展[J].广州食品工业科技,2004,20(1):104~106.  
Sun Qun, Kan Jianquan, Zhao Guohua, et al. The studying on structure-activity relationship of active polysaccharides [J]. Guangzhou Food Science and Technology, 2004, 20(1): 104~106. (in Chinese)
- 14 Yang B, Jiang Y M, Zhao M M, et al. Effects of ultrasonic extraction on the physical and chemical properties of polysaccharides from longan fruit pericarp [J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(1): 268~272.
- 15 Yang B, Zhao M M, Jiang Y M. Anti-glycated activity of polysaccharides of longan (*Dimocarpus longan Lour.*) fruit pericarp treated by ultrasonic wave[J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 629~633.

(上接第 157 页)

- 10 蒋焕煜,彭永石,申川,等.基于双目立体视觉技术的成熟西红柿识别与定位[J].农业工程学报,2008,24(8):279~283.  
Jiang Huanyu, Peng Yongshi, Shen Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereovision technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 279~283. (in Chinese)
- 11 Kanuma T, Torii T. Image analysis of crop row and position identification[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1997, 59(2): 57~63.
- 12 贾云得.机器视觉[M].北京:科学出版社,2000.
- 13 章毓晋.图像分割[M].北京:科学出版社,2001.
- 14 程培英.一种新颖的 Ostu 图像阈值分割方法[J].计算机应用与软件,2009,22(5):228~231.  
Cheng Peiying. A novel Ostu segmentation algorithm for image threshold[J]. Computer Applications and Software, 2009, 22(5): 228~231. (in Chinese)
- 15 刘兆祥,刘刚,乔军.苹果采摘机器人三维视觉传感器设计[J].农业机械学报,2010,41(2):171~175.  
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Qiao Jun. Development of a 3-dimension vision sensor in apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 171~175. (in Chinese)