

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.030

基于视觉组合的苹果作业机器人识别与定位^{*}

王辉¹ 毛文华¹ 刘刚² 胡小安¹ 李树君¹

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

【摘要】 为实现机器人自动化采摘作业,设计了苹果作业机器人识别与定位系统。模拟人类采摘过程,采用单、双目视觉组合传感器系统,克服了现有识别与定位系统对目标到视觉传感器距离的依赖性。实现了对单、双目视觉系统的单独和组合标定,与手动测量结果相比,双目视觉系统标定后3个方向的标准偏差分别为3.4、1.2和1.2 cm。提出了基于苹果颜色、形状和位置特征的识别与定位方法,试验结果表明:当工作距离为240 cm时,双目视觉系统可以准确识别并定位所有苹果,深度方向标准差为4.9 cm;当工作距离为150 cm时,双目视觉系统深度方向标准差为2.4 cm;当工作距离小于100 cm时,单目视觉传感器测量目标到传感器距离的标准偏差为1.0 cm。

关键词: 苹果 采摘机器人 识别 定位**中图分类号:** S24; TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0165-06

Identification and Location System of Multi-operation Apple Robot Based on Vision Combination

Wang Hui¹ Mao Wenhua¹ Liu Gang² Hu Xiaohan¹ Li Shujun¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to improve orchard automation, an identification and location system of apple picking robot was developed. In order to overcome dependence of existing system on the working distance, human picking process using a web camera and a Kinect sensor was imitated. Compared with manual measurements after calibration, the standard deviation of binocular vision in three directions were 3.4 cm, 1.2 cm and 1.2 cm, respectively. An apple detection and location method was developed based on color, shape and position. The results showed that when the working distance was about 240 cm, the mature apples can still be accurately identified and located, the standard deviation of binocular vision in depth direction was 4.9 cm. When the working distance was about 150 cm, the standard deviation of binocular vision in depth direction was 2.4 cm. When the working distance was less than 100 cm, the standard deviation in depth direction was less than 1.0 cm with web camera.

Key words Apple, Picking robot, Identification, Location

引言

采摘机器人或套袋机器人(统称作业机器人)作为农业机器人的重要类型,能够降低工人劳动强度和

生产费用,提高劳动生产率和产品质量,保证果实适时采收,因而具有很大的发展潜力^[1]。智能视觉系统是采摘机器人实现准确采摘的前提,设计开发适合于采摘对象的识别与定位系统是实现自动化采摘的关

收稿日期:2012-01-05 修回日期:2012-04-24

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B07)、国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB723704)和国家博士后科学基金面上项目(2012M510622)

作者简介:王辉,工程师,博士,主要从事农业机械自动化研究,E-mail: wanghui@caams.org.cn

通讯作者:李树君,研究员,博士生导师,主要从事农业工程研究,E-mail: lisj@caams.org.cn

键之一。在机器人采摘系统中,果实的精准识别与定位是其中的关键环节,能否快速、准确地识别并定位出果实将直接影响采摘机器人的实时性和可靠性。

目前,国内外在农产品收获机器人方面已经做了很多研究,机器人的识别与定位系统主要有4种形式:①单目视觉或单目视觉和位置传感器(激光或超声波位置传感器)组合,如日本蔬菜茶业研究所研制的茄子收获机器人^[2],美国佛罗里达大学的Michael等研制的柑橘采集机器人^[3],日本的Bulanon等研制的苹果采摘机器人^[4-7],比利时的Johan等研究的自动水果采摘机器人^[8]。②多光谱视觉和位置传感器组合,如日本冈山大学和爱媛大学、井关农机株式会社合作研究的黄瓜收获机器人^[9-12]。③双目或多目视觉传感器组合,如日本Shigehiko等研制的番茄收获机器人^[13]。④基于激光测距仪的三维图像传感器,如日本岛根大学和大阪府立大学研制的番茄收获机器人^[14]。

国内研究相对于发达国家起步较晚,中国农业大学^[15-17]、江苏大学^[18-19]、浙江大学^[20-21]、南京农业大学^[22]、华南农业大学^[23]等都开展了果实采摘机器人的研究,在草莓、蘑菇、黄瓜、西红柿、茄子等果蔬采摘机器人方面作了较深入地研究,其识别和定位系统主要有2种形式:单目视觉或单目视觉与位置传感器(激光或超声波位置传感器)组合;双目视觉传感器组合。

现有机器人识别和定位系统存在以下问题:双目视觉系统在空间定位上一般要求传感器和目标之间距离大于50 cm;单目视觉与位置传感器的组合形式一般要求传感器与目标的距离小于100 cm;基于激光测距仪的三维图像传感器或多光谱系统成本太高。因此,本文建立低成本的双目组合识别与定位系统,先由双目视觉系统在远处根据苹果的颜色、形状和位置特征进行识别和定位,然后由安装在执行机构下端的单目视觉系统,在近距离对目标进行锁定和采摘。

1 识别与定位系统建立

1.1 工作原理

模拟人类采摘苹果过程建立的苹果采摘机器人识别与定位系统由双目视觉识别定位系统、信息处理与决策系统、单目视觉识别锁定系统组成,如图1所示。先在远处利用双目视觉传感器识别并定位树上苹果,然后选定其中一个目标,将信息发给信息与决策系统,转换成单目视觉系统的信息,在近距离识别并锁定目标,机械手根据已建立基于图像反馈的控制方法,实现采摘。采摘一个目标后,机器臂回到

初始位置进行下一目标的采摘,直至采摘完成已识别和定位的所有目标,机器人移动并重新进行目标的识别、定位和采摘。

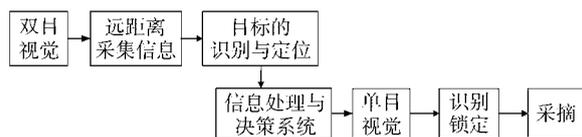


图1 系统工作原理

Fig.1 Working diagram of system

其中,由于采摘作业是机械手对目标进行抓取,所以手臂或是枝叶会对双目视觉传感器有所遮挡,为实现近距离准确采摘,需要将双目视觉系统计算得到的目标空间位置和尺寸信息转换成单目视觉系统下的相对位置和尺寸,并利用单目视觉在近距离实现采摘。由于单、双目视觉传感器位置相对固定,则两坐标系之间的转换公式是固定不变的,可根据组合标定方法得到。

1.2 传感器

识别与定位系统的传感器包括单目和双目视觉系统两部分,如图2所示。双目视觉系统采用PrimeSensor公司的双目视觉传感器Kinect,由彩色视觉传感器和红外视觉传感器组成,红外视觉传感器采集与彩色图像对应的深度图像;单目视觉系统安装在机械手下方,使用普通的网络摄像头;单目和双目视觉的图像分辨率都为640像素×480像素,帧率60帧/s。

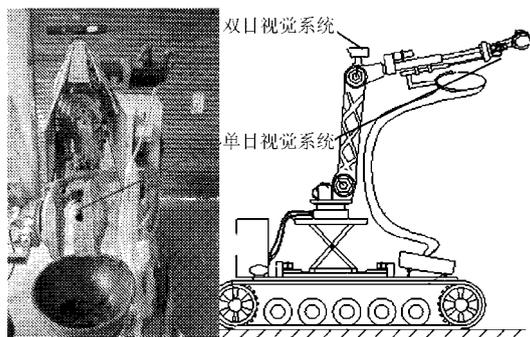


图2 采摘机器人识别与定位系统

Fig.2 Identification and location system of picking robot

1.3 系统标定

为了实现对目标的精准定位,需要建立相应的数学模型,并对相机的镜头进行校正;然后,分别对单、双目视觉系统进行标定,再组合标定并求解出两视觉系统之间信息传递公式。如图3所示,苹果中心点 P 在不同的单、双目坐标系下对应有不同的空间位置 P_0 和 P_1 ,所以需要单、双目定位系统进行组合标定才能找到其空间位置的转换关系。

利用张正友^[24]和Heikkila^[25]标定法,分别求解双目视觉系统的彩色和红外相机的内参数,以及单

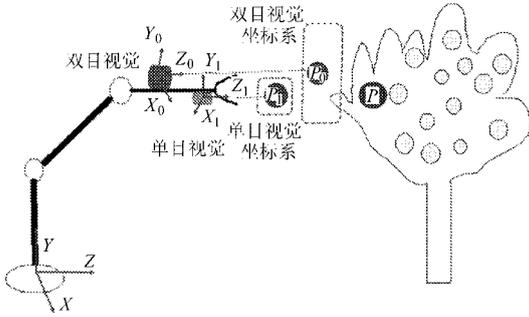


图 3 单、双目定位系统标定

Fig. 3 System calibration of single vision and binocular vision

目相机的内参数,主要包括像素意义下 X 、 Y 轴的焦距 (f_x, f_y),光心基准点 (c_x, c_y) 和镜头畸变参数 k_c 。

然后,利用棋盘标定法组合标定彩色和红外相机之间的转换关系,以及双目视觉系统的彩色相机和单目视觉系统之间的转换关系,得到各自外参数即旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 。

系统标定中两视觉系统之间的信息传递是关键。由于 Kinect 传感器和单目视觉图像分辨率一样,但不是安装在同一个位置,则两者间每个像素点反映的信息量是不一样的,所以两视觉系统之间传递的信息是目标外径尺寸和型心位置。目标外径尺寸用于单目视觉系统在近距离计算目标到传感器的距离,型心位置用于调整机械手的空间位置,让机械手和苹果保持在同一条水平直线上,从而调整机器执行结构对目标进行锁定和采摘。

2 目标的识别与定位方法

2.1 双目视觉系统目标识别与定位

双目视觉传感器采集了视场内的彩色图像和深度图像,苹果的识别和定位方法利用了彩色图像所包含的苹果的颜色和形状信息,以及深度图像所提供的苹果到传感器的距离信息,如图 4 所示。

2.1.1 颜色特征分析

成熟苹果主要呈红色,与背景颜色差别显著,因此,利用彩色图像的 R 、 G 、 B 3 通道信息,模拟超绿算法^[26],使用超红算法快速识别苹果目标,并对处理过的数据进行二值化处理。超红算法公式为

$$I = 2R - G - B$$

$$b(i, j) = \begin{cases} 1 & (I(i, j) \geq 0) \\ 0 & (I(i, j) < 0) \end{cases}$$

式中 R 、 G 、 B ——彩色图像红、绿、蓝 3 个通道数据
 I ——超红计算结果

$b(i, j)$ ——二值化结果

2.1.2 形状特征分析

苹果是球形的,平面图像上显示近圆形,其外接

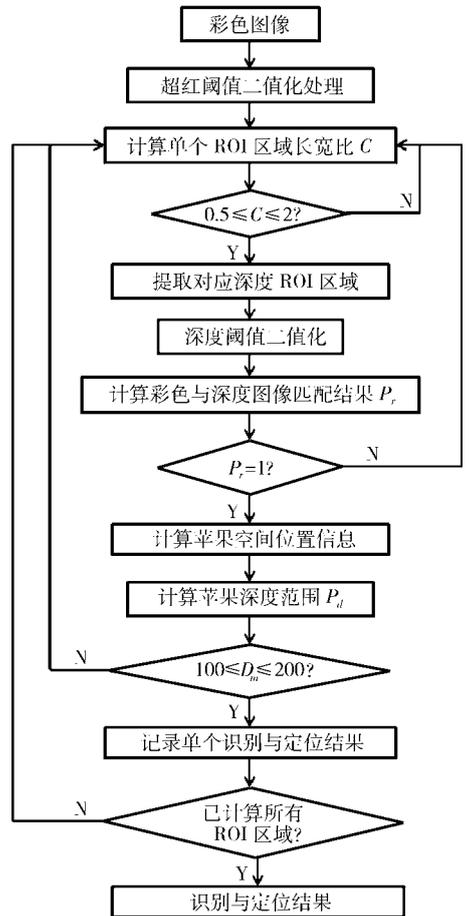


图 4 苹果识别和定位流程图

Fig. 4 Flow chart of target detection and location

矩形的长宽比在一定范围内。因此,使用行程标记算法^[27-29],将二值化图像中的每个目标都单独提取出来,并找到包含该目标的最小外接矩形,定义矩形区域为感兴趣区域(ROI),并计算矩形相关信息,包括起始点坐标 (P_{cx}, P_{cy}),长度 L 和宽度 H ,并求解其长宽比,即

$$C = L/H$$

$$R_t = \begin{cases} 1 & (0.5 \leq C \leq 2) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (t = 1, 2, \dots, n)$$

式中 R_t ——ROI 区域形状是否满足苹果外形,满足,取 1;不满足,取 0

n ——分割后目标区域个数

2.1.3 深度和彩色信息匹配

当 $R_t = 1$ 时,提取与彩色图像 ROI 区间对应的深度图像 ROI 区间,对此区间进行二值化,阈值及求解方法为

$$T_r = \frac{1}{LH} \sum_{i=P_{cx}}^{P_{cx}+L} \sum_{j=P_{cy}}^{P_{cy}+H} P_d(i, j)$$

$$P_t(i, j) = \begin{cases} 1 & (P_d(i, j) \geq T_r) \\ 0 & (P_d(i, j) < T_r) \end{cases}$$

式中 T_r ——深度图像二值化分割阈值

$P_d(i,j)$ ——深度图像 ROI 区域像素点深度
 $P_r(i,j)$ ——深度图像 ROI 区域二值化后像素值

然后使用行程标记算法检测最大面积的区域所对应的面积值,并与设定的面积阈值进行比较,判断其是否为目标,计算方法为

$$T_i = 0.5LH$$

$$P_r(i,j) = \begin{cases} 1 & (A_d \geq T_i) \\ 0 & (A_d < T_i) \end{cases}$$

式中 T_i ——二值化后八连通区域面积分割阈值
 A_d ——深度图像二值化后八连通区域的面积
 P_r ——深度图像与彩色图像匹配结果

2.1.4 苹果位置信息

设定苹果相对传感器的空间位置在一定范围内,二者距离计算方法为

$$P_d(i,j) = \begin{cases} P(i,j) & (P_r(i,j) = 1) \\ 0 & (P_r(i,j) = 0) \end{cases}$$

$$D_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_d(i,j)$$

$$R_1 = \begin{cases} 1 & (100 \leq D_m \leq 200) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中 D_m ——深度像素点的均值
 R_1 ——目标识别后判别结果

只有当 $R_1 = 1$ 时,即目标与传感器之间距离在 100 ~ 200 cm 内,且颜色和形状特征同时满足才确认目标为苹果。

因此,综合分析苹果的颜色、形状和位置特征,得到识别苹果的 3 个依据:①其颜色为红色区域。②其彩色和深度对应的 ROI 区域长宽比在 0.5 ~ 2 之间。③苹果相对于视觉传感器的位置在一定范围内(100 ~ 200 cm)。

2.1.5 空间定位方法

根据摄像机的数学模型以及相机的内、外参数,摄像机单个方向(水平或垂直)可视区域原理图如图 5 所示。

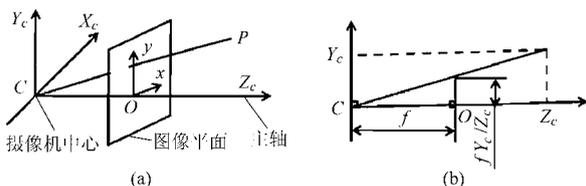


图 5 空间定位方法

Fig.5 3-D location method

(a) 相机三维空间与像平面关系 (b) 投影平面几何关系

彩色图像中的目标点 (X,Y) 在空间中对应的三维坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 为

$$D = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2}$$

$$X_c = \frac{XZ_c}{f} \quad Y_c = \frac{YZ_c}{f}$$

式中 D ——苹果到传感器的距离信息
 f ——相机焦距, cm

2.2 单目视觉系统目标识别与定位

根据由双目视觉系统传递来的苹果空间位置和尺寸信息,单目视觉系统自动调整机械手的空间位置,让机械手和苹果保持在同一条水平直线上,以利于使用单目相机进行识别和锁定。

先根据颜色信息,将采摘苹果分割出来,并计算其外接矩形像素的长宽,结合其真实长宽进行计算,得到当前传感器到苹果的水平距离信息为

$$D_s = \frac{f_s L_t}{L_s}$$

式中 L_t ——双目传感器测量得到的目标长度, cm
 f_s ——单目相机的焦距长度, 像素
 L_s ——单目图像中目标的像素长度

图 6 所示为单目视觉定位原理图。

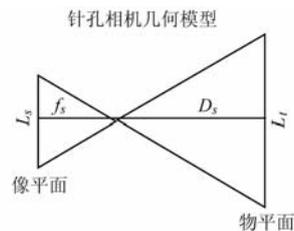


图 6 单目相机定位方法

Fig.6 Location method based on monocular vision

3 结果与讨论

3.1 标定后双目系统精度测试结果

为测试双目视觉传感器在距离目标不同深度时空间重建的测量精度,利用双目视觉传感器对一长方体框架进行三维重建,并与手动测量结果进行对比。实际测试中,选用的长方体框架如图 7a 所示,图 7b 是彩色图像对应的深度图像。

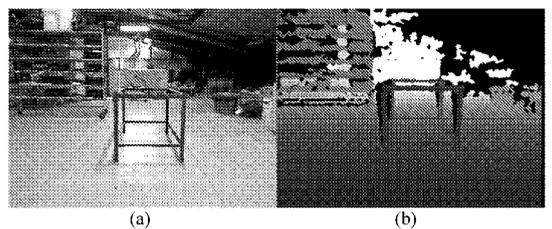


图 7 用于精度校正的原始图像

Fig.7 Source image for precision test

(a) 彩色图像 (b) 深度图像

三维重建后的结果如图 8 所示。通过统计可以得出,与手动测量结果相比,传感器测量框架长、宽、高的标准偏差分别为 3.4、1.2 和 1.2 cm。进一步分析发现,当目标距离传感器小于 200 cm 时,框架长

度(视觉的深度)测量值标准差为 2.2 cm, 比较稳定; 当大于 200 cm 时, 传感器深度测量方向标准差为 6.4 cm, 相对较大。

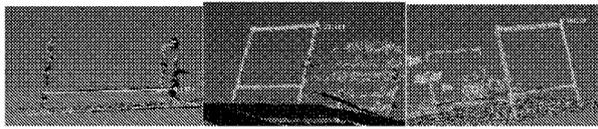


图 8 三维重建后测量目标长、宽、高

Fig. 8 Results of 3-D reconstruction

究其原因, 主要是 Kinect 传感器在深度方向的距离是通过线性标定来实现的, 而目标深度方向并不呈线性变化, 所以深度方向小于 200 cm 时测量精度比较稳定, 当大于 200 cm 时测量精度变差。

3.2 双目视觉系统识别与定位结果

在识别与定位试验中, 选取 2 个距离对双目系统的识别和定位精度进行测试, 远距离是在双目视觉传感器距离苹果树干 2.4 m 处, 近距离是在双目视觉传感器距离苹果树干 1.5 m 处。苹果树上共有 10 个苹果, 以人工用标尺手动测量得到的 10 个苹果与双目视觉传感器的距离为真值。双目视觉系统的目标识别和定位方法测量结果如表 1 所示, 处理结果示例如图 9 所示。

表 1 双目视觉系统的苹果定位试验结果

Tab. 1 Result of location with Kinect sensor cm

1.5 m 处自动 测量距离	1.5 m 处手动 测量距离	2.4 m 处自动 测量距离	2.4 m 处手动 测量距离
160.6	161.5	222.5	228.0
156.8	155.5	229.6	225.0
158.9	159.0	222.4	223.0
161.7	162.0	232.7	239.0
156.8	153.0	229.7	240.5
171.2	174.5	228.2	233.0
159.4	158.5	228.2	233.5
172.3	176.5	252.5	252.0
159.6	158.5	242.1	241.5
164.5	163.0	256.1	256.0

在 1.5 m 处, 10 个苹果全部识别并定位出, 其深度方向标准偏差为 2.4 cm; 在 2.4 m 处, 10 个红色苹果全部识别并定位出, 深度方向标准偏差为 4.9 cm。

3.3 单目视觉系统识别与定位结果

根据双目视觉系统传递过来的空间位置及尺寸, 利用单目视觉系统, 在工作距离小于 100 cm 对苹果图像进行识别与锁定。以人工用标尺手动测量为基准, 同时单目视觉传感器测量目标到传感器的距离, 其中 3 个目标在 6 个不同距离进行测量的结果比较如表 2 所示。

单目视觉系统能够准确识别出所有苹果, 根据表 2 中数据, 与手动测量比较, 单目视觉传感器测量

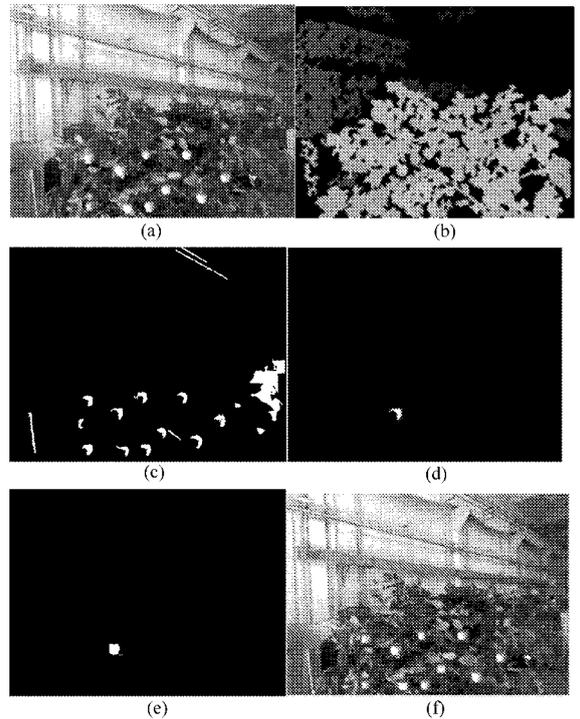


图 9 苹果识别定位方法的处理结果

Fig. 9 Result of identification with Kinect sensor

(a) 彩色原始图像 (b) 深度原始图像

(c) 二值化图像 (d) 彩色 ROI 形状分析

(e) 深度 ROI 形状特征分析 (f) 识别定位结果

表 2 单目视觉系统苹果定位试验结果

Tab. 2 Result of location with web camera cm

目标 1		目标 2		目标 3	
手动	传感器	手动	传感器	手动	传感器
78.0	76.2	77.0	76.4	81.5	80.9
65.0	64.9	64.0	63.6	62.0	61.2
58.0	58.1	52.0	52.8	51.0	51.1
45.0	45.5	40.0	40.7	38.7	38.0
35.0	35.8	30.0	31.0	31.0	31.5
20.5	22.2	20.0	21.8	19.5	18.8

目标到传感器距离的标准偏差为 1.0 cm, 完全达到采摘的要求。

4 结束语

采摘机器人的核心是目标的识别与定位系统, 而识别与定位系统的精度决定了采摘苹果的准确率。本文所研制的苹果采摘机器人识别与定位系统, 具有如下特点: 模拟了人类的采摘过程, 具有良好的通用性。采用彩色和深度双目视觉传感器, 开发的基于颜色、形状和位置特征的苹果识别方法, 能准确进行成熟苹果的识别及空间定位, 当工作距离小于 200 cm 时, 深度标准差为 2.4 cm, 当工作距离大于 200 cm 时, 深度标准差为 4.9 cm。采用网络摄像头建立的单目视觉系统, 能精准定位采摘果实, 目标到传感器定位距离的标准偏差为 1.0 cm。

参 考 文 献

- 1 中国农业信息快讯编辑部. 我国水果种植面积和产量双居世界第一[J]. 中国农业信息快讯, 2000(3): 39.
- 2 Hayashi S, Ganno K, Ishii Y, et al. Robotic harvesting system for eggplants [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2002, 36(3): 163 ~ 168.
- 3 Harman M W, Burks T F. Current developments in automated citrus harvesting [C] // ASAE/CSAE Annual International Meeting, Paper No. 43087, 2004.
- 4 Bulanon D, Kataoka T, Ota Y, et al. A machine vision system for the apple harvesting robot [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2001(3): Paper No. 01006, 2001.
- 5 Bulanon D, Kataoka T, Ukamoto H, et al. Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot [C] // IEEE SICE 2004 Annual Conference, 2004: 595 ~ 598.
- 6 Bulanon D, Kataoka T, Okamoto H, et al. Determining the 3-D location of the apple fruit during harvest [C] // Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment (ATOE), Paper No. 701P1004, 2004.
- 7 Bulanon D, Kataoka T, Okamoto H, Hata S. Feedback control of manipulator using machine vision for robotic apple harvesting [C] // ASAE/CSAE Annual International Meeting, Paper No. 053114, 2005.
- 8 Baeten J, Donn K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester [C] // International Conference on Field and Service Robotics, Paper No. 00194739, 2007.
- 9 Kondo N, Monta M, Fujiura T. Fruit harvesting robots in Japan [J]. Advances in Space Research, 1996, 18(1/2): 181 ~ 184.
- 10 van Henten E, van Tuijl B, Hemming J, et al. CUPID-an autonomous cucumber picking device [C] // Proceedings Mechatronics 2002: 8th Mechatronics Forum International Conference, University of Twente, Netherlands, 2002.
- 11 van Henten E, van Tuijl B, Hoogakker G J, et al. An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 317 ~ 323.
- 12 van Henten E, van Tuijl B, Hemming J. Field test of an autonomous cucumber picking robot [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 305 ~ 313.
- 13 Hayashi S, Ota T, Kubota K, et al. Robotic harvesting technology for fruit vegetables in protected horticultural production [C] // Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production, FRUTIC, 2005: 227 ~ 236.
- 14 Subrata I D M, Fujiura T, Nakao S, et al. 3-D vision sensor for cherry tomato harvesting robot [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1997, 31(4): 257 ~ 264.
- 15 周天娟. 基于机器视觉的草莓采摘机器人技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- 16 赵金英. 基于三维视觉的西红柿采摘机器人技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- 17 徐丽明. 草莓收获机器人系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- 18 李玉良. 基于立体视觉的遮挡柑橘识别与空间匹配研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- 19 赵鹏. 果树采摘机器人目标定位系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- 20 徐惠荣. 基于机器视觉的树上柑桔识别方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- 21 申川. 基于双目立体视觉系统的设施农业作物位置信息提取[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- 22 姚立健. 茄子收获机器人视觉系统和机械臂避障规划研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- 23 张江州. 荔枝采摘机械手机器视觉部分的关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- 24 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330 ~ 1334.
- 25 Heikkilla J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 1106 ~ 1112.
- 26 Ohta Y I, Kanade T, Sakai T. Color information for region segmentation [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 13(3): 222 ~ 241.
- 27 凌云. 基于机器视觉的谷物外观品质检测技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- 28 崔鹏, 陈志, 张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 149 ~ 153. Cui Peng, Chen Zhi, Zhang Xiaochao. Statics Analysis of apple-picking robot humanoid manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 149 ~ 153. (in Chinese)
- 29 周俊, 程嘉煜. 基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 154 ~ 158. Zhou Jun, Cheng Jiayu. Moving obstacle detection based on machine vision for agricultural mobile robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 154 ~ 158. (in Chinese)