

自然条件下番茄成熟度机器人判别模型^{*}

尹建军¹ 毛罕平¹ 王新忠¹ 沈宝国^{1,2}

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部/江苏省重点实验室, 镇江 212013;

2. 镇江机电高等职业技术学校, 镇江 212013)

【摘要】 针对机器人采摘番茄因用途不同而进行选择收获的问题,对人工选择的番茄图像样本集进行特征分析,从番茄的摄像机透视几何出发,提出将番茄表面红色调所占着色面积比与其他色调所占着色面积比的差值作为描述番茄成熟程度的主要分组特征。利用该特征并结合番茄着色区域整体色调均值和方差,用BP神经网络建立番茄成熟度的判别模型。通过模型测试和噪声水平测试表明,将着色面积比差值和色调均值作为模型的两个输入时,模型的准确判别率和抗干扰能力都是最佳的。模型测试的准确判别率为97.5%,当噪声水平在0.05以下时准确判别率可达到95.26%以上,可以为番茄自动收获作业提供一定的理论参考依据。

关键词: 农业机器人 番茄 计算机视觉 神经网络 成熟度

中图分类号: TP391.41; TP242.6⁺1

文献标识码: A

Judgment Model on Maturity of Harvesting-tomato for Robot under Natural Conditions

Yin Jianjun¹ Mao Hanping¹ Wang Xinzong¹ Shen Baoguo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China 2. Zhenjiang Vocational College of Mechanical & Electrical Technology, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Aiming at the problems of selective harvesting-tomato for robot according to various purposes, feature extraction and analysis of tomato image from artificial selection were firstly performed. Proceeding from camera perspective geometry of tomato, difference value between rendering area ratio of red hue to whole tomato region and rendering area ratio of other hue to whole tomato region was presented by way of main grouping feature of judgment model to describe maturity of tomato. An automatic judgment model on maturity of tomato based on BP NN was built up by using above feature combined with hue mean and variance of whole rendering region of tomato. Validation test and noise level test of models show that the model can keep higher accuracy and nicer anti-interference when difference value of area ratio and hue mean are selected as two inputs of BP NN. The accuracy of validation test and noise level test is 97.5%. The accuracy can reach above 95.26% when noise level is under 0.05. The model can provide theoretical reference of automatic harvesting-tomato for robot.

Key words Agricultural robot, Tomato, Computer vision, Neural network, Maturity

引言

果实收获因用途不同对采摘时的成熟度要求也

不同,恰当的选择收获时期对果实的品质保证是有利的。和固定光箱情况下的番茄成熟度检测不同的是,机器人采摘番茄时不同深度距离下不同成熟程

度的番茄会同时存在于同一幅图像中。所以,番茄采摘机器人必须适应果实采摘时忽近忽远的变结构环境要求,具备根据番茄用途进行选择采摘的能力。目前所研制的果实收获机器人,多数通过人工辅助判断是否成熟和确定采摘的时期。利用机器视觉技术实现果实成熟度的无损检测是目前国内外研究的热点课题,有许多学者对此进行了研究^[1-7]。

本文选择成熟的红色番茄为研究对象,研究机器人在自然条件下选择性收获番茄时的成熟度无损检测方法,弥补人工辅助判别番茄成熟度的主观性缺陷,为实现番茄选择性收获提供依据。

1 材料与方 法

1.1 番茄图像的获取与选择

在温室中培育番茄样本(番茄品种为金鹏 1 号),使用数码相机在晴天光照条件下拍摄番茄的整个成长过程,即从未熟期、绿熟期、转色期(果实颜色主要以绿色为主泛红)、半熟期(果顶部的橙红色扩展到果腹部,着色程度约为一半左右)、成熟期(果实特有的颜色扩大到全面,但果基部有绿色或黄色)和完熟期(完全着色且呈现一层浓厚的颜色)6 个阶段,在江苏省镇江市汝山蔬菜示范园区拍摄了部分田间的番茄图像,共采集番茄样本图像 254 幅。根据 Helyes 等人的研究结果^[1,4]:果皮色泽与果实成熟度存在极高的相关性。本文利用此特性作为番茄成熟度检测的视觉特征,依靠人眼对成熟度的感受程度,从样本图像中选择转色期、半熟期、成熟期和完熟期的图像各 25 幅,作为番茄成熟度评价的原始数据,图 1 是其中的一组图像。样本番茄的生长状态主要以相互分离或单果被枝叶局部遮挡的情况为主,也包括多果重叠的情况。

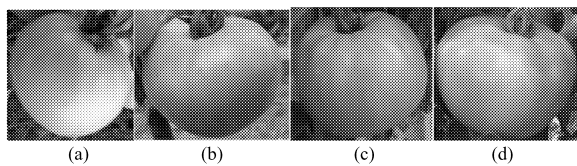


图 1 一组典型样本图像

Fig. 1 A set of typical sample image

(a) 转色期 (b) 半熟期 (c) 成熟期 (d) 完熟期

1.2 番茄的成熟度特征描述

番茄的成熟度检测是通过描述番茄表面颜色特征来间接测定的。为了便于测定和使用颜色,目前已经建立了十几种颜色模型^[8],其中 HSV 颜色模型的色度、亮度和饱和度信息相互独立,便于对彩色图像中的色调信息进行提取和分析。在此选用 HSV 颜色模型来提取番茄的成熟度特征。

番茄成熟是一个渐变的过程,从绿熟期到转色

期,番茄表面颜色由绿变黄再微泛红,黄绿部分区域大于泛红部分;在半熟期,番茄表面颜色的泛红部分区域与黄绿部分区域相当,对应 HSV 颜色空间的色调值从 120° 到 0° ,视觉感受的色彩从黄色渐变为红色;在成熟期,番茄表面颜色主要以红色调为主,在完熟期则几乎完全是红色调,对应 HSV 颜色空间的色调值 0° 左右的一个较大区间,视觉感受的色彩从黄色渐变为红色到泛紫,若饱和度大,则色彩越浓,否则越淡。

色调均值和方差用来描述着色区域色调分布的整体平均大小和均匀程度。根据番茄的上述生理特点,为了能将紫红和红、红黄和黄绿颜色分开,计算时将视觉感受为发红色调的区间确定为 $[345^\circ, 360^\circ]$ 和 $[0^\circ, 30^\circ]$ 。图 2 为不同成熟期番茄表面的色调均值分布散点图。图 3 为不同成熟期番茄表面的色调均值-方差的二维分布散点图。

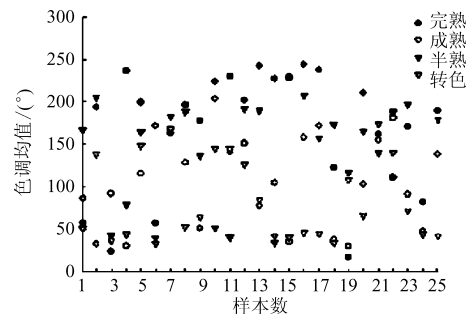


图 2 不同成熟期番茄表面的色调均值散点图

Fig. 2 Scatter plot of hue mean of tomatoes image

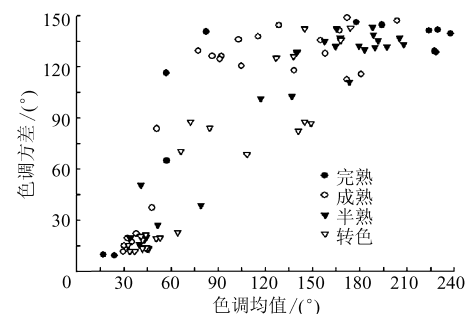


图 3 不同成熟期番茄表面的色调均值-方差散点图

Fig. 3 Scatter plot of hue mean and hue variance of tomatoes image

由图 2 和图 3 可见,当番茄为完熟和成熟状态时,色调均值主要集中在 45° 和 210° 左右,其均值和方差不是较大就是较小,且同步变化。但当番茄为半熟和转色状态时,其均值和方差变化交叉,且与完熟和成熟状态存在严重重叠。也就是说,不同成熟期的番茄表面着色区域可以具有相同的色调均值和方差分布。因此,利用番茄着色区域的色调均值和方差来描述番茄的成熟程度^[5],可区分性差。

根据摄像机的透视模型,设番茄可视面为半球,成像距离为 Z ,其轮廓在成像平面上的投影一般为

椭圆,成像平面与相机光心的距离即为焦距 f ,如图 4b所示。

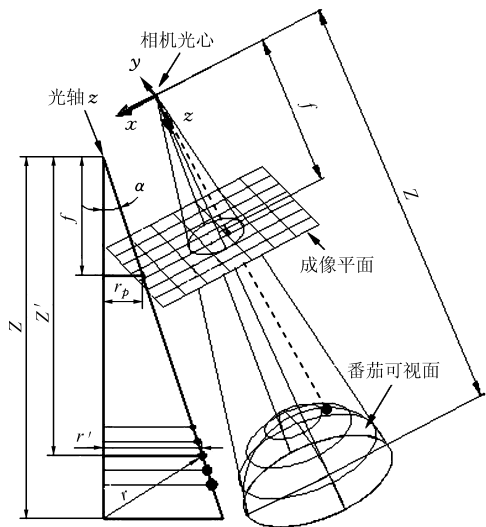


图4 番茄的透视模型

Fig.4 Perspective model of tomato

成像平面上的任一像素,其至图像主点(光轴与成像平面的交点)的距离为 r_p (单位为像素),均对应半球面上一个微面积 S' ,其中心至光轴 z 的距离为 r' ,沿光轴距离为 Z' ,如图 4a 所示,该面积与像素的投影比例关系可表示为

$$\frac{S'_i}{S_{pixel}} = \left(\frac{r'_i}{r_{pi}}\right)^2 = \left(\frac{Z'_i}{f}\right)^2 = C_i \quad (1)$$

对于每一个聚焦距离 Z , f 是定值,若 Z' 已知,则 C_i 为常数。沿投射角 α 方向,当微面积离相机光心或远或近, Z' 取不同的值,对应成像平面为同一像素,式(1)仍成立,即说明该比例关系与拍摄距离无关。当微面积在球面上的分布为不同位置, Z' 也取不同的值, C_i 为变常数,说明该比例关系与着色区域在球面上的分布位置有关。

对于一幅 $M \times N$ 大小的番茄图像,定义着色面积比差值

$$a_r = \frac{S_r^{pixel} - S_{yg}^{pixel}}{S_r^{pixel} + S_{yg}^{pixel}} = \frac{S_r^{pixel} - S_{yg}^{pixel}}{S_r^{pixel} + S_{yg}^{pixel}} \quad (2)$$

式中 S_r^{pixel} ——红色调区间的面积(像素和),对应番茄表面积 S_r

S_{yg}^{pixel} ——除红色调外其他色调区间的面积,对应番茄表面积 S_{yg}

S^{pixel} ——番茄轮廓投影区域总面积,对应番茄表面积 S

联立式(1)和(2),着色面积比差值 a_r 也可表示为

为

$$a_r = \frac{S_r^{pixel} - S_{yg}^{pixel}}{S_r^{pixel} + S_{yg}^{pixel}} = \frac{\sum (S_{ri}^{pixel} - S_{ygi}^{pixel})}{\sum (S_{ri}^{pixel} + S_{ygi}^{pixel})} =$$

$$\frac{\sum [(S_{ri} - S_{ygi})/C_i]}{\sum [(S_{ri} + S_{ygi})/C_i]} = \frac{S_r - S_{yg}}{S_r + S_{yg}} = \frac{S_r - S_{yg}}{S} \quad (3)$$

式(3)说明,图像的着色面积比差值为一无量纲参数,与番茄实际着色面积比差值存在确定的映射比例关系。因此,可用该特征进行番茄成熟度描述。该特征值大小在 $[-1, 1]$ 范围内变化,反映了番茄着色变化的不均匀程度。当番茄为完熟状态时, a_r 为最大值 1, 当为黄绿的不成熟状态时, a_r 为最小值 -1 。图 5 为不同成熟期番茄样本着色面积比差值的分布情况。

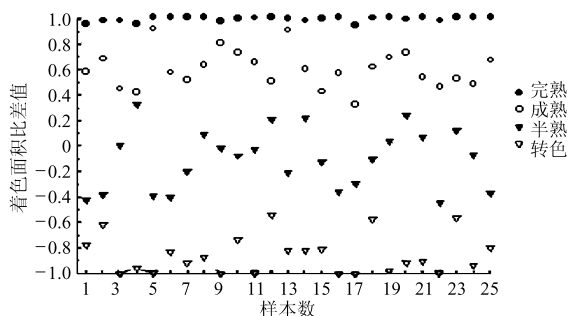


图5 不同成熟期番茄样本着色面积比差值的分布情况

Fig.5 Difference value distribution of rendering area ratio of tomato under various maturity

由图 5 可以看出,当番茄由转色期的不成熟状态渐变为完熟状态时,其值从 -1 渐变为最大值 $+1$,说明该特征值能模仿人眼感受番茄的成熟程度。转色期与和半熟期有明显差异,完熟期分布较为稳定,半熟期与成熟期的分布幅值变化较大。从转色到完熟的整个过程中,各过渡区间存在少量重叠,反映了番茄生长的渐变过程。

鉴于上述分析,本文提出将番茄表面红色调所占着色面积比与黄绿色调所占着色面积比的差值作为主要分组特征,并结合着色区域整体色调均值和方差来进行番茄成熟程度的描述。对于番茄生长状态为相互分离的情况,以上成熟度特征的提取过程是按照下述方法进行处理:①读入原始图像,提取 $R-G$ 色差灰度图像,利用 Otsu 最大类间方差法进行番茄图像的动态阈值分割。②将分割后的二值图像进行形态学处理,即经过消除小区域、用直径为 8 的圆盘状结构元进行腐蚀运算、填充空洞区域、再用直径为 8 的圆盘状结构元进行膨胀运算,得到平滑边界,最后进行轮廓跟踪,并进行区域标记(图 6a),统计区域总像素和(即总面积),如图 6b。③提取区域的最小外接矩形(图 6a),以该矩形的大小生成去除背景的模板,即在轮廓边界内的像素值为 1,在轮廓边界与矩形之间的像素值为 0,用该模板与原始图像做卷积运算去除背景(图 6c)。④将去除背景

的 RGB 图像转化为 HSV 格式(图 6d),提取色调 H 灰度图像,计算色调均值和方差,再通过直方图统计方法(图 6e),计算着色区域内色调在 $[345^\circ, 360^\circ]$ 和 $[0^\circ, 30^\circ]$ 内的像素和,按式(2)得到着色面积比差值。

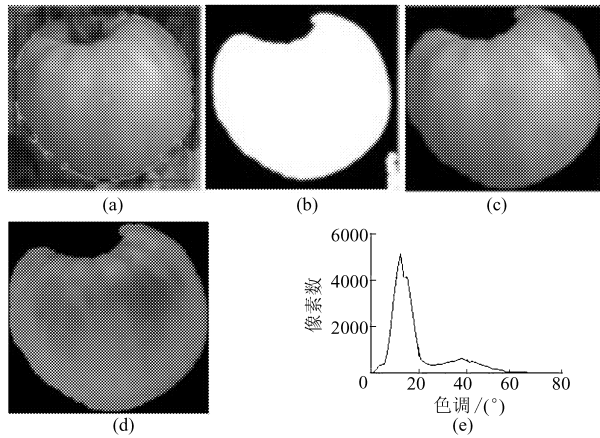


图 6 番茄成熟度特征提取过程示意图

Fig. 6 Flow chart of feature extraction of tomato maturity

(a) 原始图像 (b) 图像平滑 (c) 去除背景
(d) HSV 格式转换 (e) 直方图统计

1.3 判别模型的建立

采用 3 层 BP 网络结构,网络输入尝试不同的特征组合,分别为单输入(着色面积比差值)、两输入(着色面积比差值和色调均值)以及着色面积比差值、色调均值和色调方差三特征输入,色调均值和方差为归一化处理值。输出量为 4 个,采用二进制编码分别代表完熟、成熟、半熟和不成熟番茄,其对应编码分别为(1 0 0 0), (0 1 0 0), (0 0 1 0)和(0 0 0 1)。BP 网络参数的设定如下:①对隐层和输出层均采用对数 S 形函数作为激励函数,使网络输出范围落在 0 和 1 之间,适合接近 0 或 1 的网络输出编码值。②网络实际输出通过一个竞争作用函数(输出中的最大值竞争获胜取为 1,其他取为 0)转化为代表成熟度的二进制编码。③为便于不同输入下网络性能的比较,网络隐层节点数取为 20。④网络训练终止条件为训练集误差的均方根之和小于 0.000 1,样本集划分为训练集、验证集和测试集,分别占 70%、10%和 20%。采用规则化调整来提高网络的泛化能力,3 种不同输入的网络均能收敛到终止条件。

2 试验结果与分析

2.1 模型测试

利用上述模型,在原始数据以外随机选择不同成熟期图像各 10 幅进行番茄成熟度判别,其结果如表 1 所示。

从表 1 可知,两输入的网络的性能是最佳的,准

确判别率为 97.5%,误判率为 2.5%,误判发生在各成熟度级的过渡区间。产生误判的原因是,实际应用时模型的实际输入特征值受到相机拍摄角度、光照、枝叶遮挡、多果重叠以及特征提取方法的影响,建模时的样本不可能包括自然条件下番茄生长的所有情况。因此,当实际输入特征值时模型进行插值运算,若和样本的特征值分布不吻合时,模型会出现误判。

表 1 不同输入下的模型测试结果

Tab. 1 Test results of models with various input numbers

参数	单输入	两输入	三输入
误判转色番茄数	0	0	1
误判半熟番茄数	1	0	0
误判成熟番茄数	0	0	0
误判完熟番茄数	1	1	1
判断准确总数	38	39	38
判断错误总数	2	1	2
准确判别率/%	95.0	97.5	95.0

将番茄简化为球体,但在不同成像角度,可视半球面在成像平面上的投影是二次曲线,正拍时番茄表面投影为圆,其余情况多为椭圆。实际上,番茄并不是标准球体,成熟度图像检测仅反映番茄可视表面信息,加上枝叶遮挡和光照的影响,不同角度拍摄同一位置的番茄得到的图像有微小差异,因此拍摄角度会对成熟度特征提取产生影响。图 7a 与 7b 所示为平行配置的双目(两相机基线距离 120 mm)采集的图像,左目图像和右目图像的面积比差值分别为 0.992 35 和 1.0。

在自然条件下,剧烈的光照变化对相机的成像质量有大的影响,比如强光照射下会导致番茄表面出现泛白光晕,如图 7e 所示,特征提取时番茄轮廓比实际可视面小,提取轮廓(红色曲线)包围的着色面积比差值为 0.978 91,而借助手工参与提取的可视面着色面积比差值为 0.937 73。

实际中大量存在枝叶遮挡以及多果重叠的情况,如图 7c 与 7d 所示为同一深度距离下番茄无遮挡和有遮挡的情况,无遮挡下和有遮挡下的着色面积比差值分别为 1.0 和 0.999 45。图 7f 为多果重叠的情况,经受控标记的分水岭算法^[9]分离各果实后提取的着色面积比差值分别为:左上 0.918 13,左下 0.997 94,右上 0.980 4 和右下 0.819 34。

以上提取结果是和特征提取方法相关的,利用基于色差特征进行不同成熟度番茄图像的动态阈值分割,大大消除了固定阈值分割图像时不同样本在阈值附近出现颜色误判的情况。

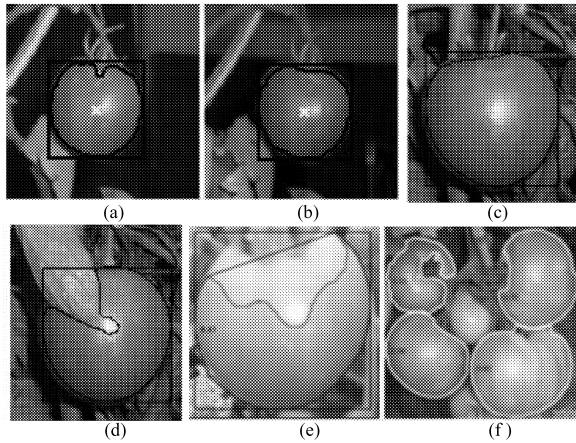


图7 番茄成熟度判定的影响因素

Fig.7 Influencing factors of determining tomato maturity

(a) 左目图像 (b) 右目图像 (c) 无遮挡情况
(d) 有遮挡情况 (e) 强光照射情况 (f) 多果重叠情况

综合上述情况,实际提取结果总体上符合番茄样本着色面积比差值分布,模型判别结果和人眼的视觉感受一致,说明模型的容错能力较强。

2.2 噪声水平测试

为了测试模型的鲁棒性,即模型的抗干扰能力,在此采取的方法是:在原始数据上增加随机噪声,噪声水平以0.01的步长递增到0.10,每级噪声水平下仿真训练好的网络100次,然后统计与期望输出类别的误判率平均值。噪声数据的产生,是将噪声水平看作输入数据的方差,再乘以随机数发生函数值,这样可以将噪声数据控制在输入以噪声水平为方差的分布范围内。不同噪声水平下的模型误判率计算结果列于表2中。

从表2中数据来看,随着噪声干扰强度的加大,3个网络模型的误判率都在上升。单输入网络的抗干扰能力最弱,在相同噪声水平下其误判率最大。两输入网络的误判率和运行速度总体上比三输入网

表2 不同噪声水平下的模型误判率

Tab.2 Detecting error percentage of models under various noise levels %

噪声水平	单输入	两输入	三输入
0.01	1.41	0.02	0.01
0.02	2.55	0.51	0.59
0.03	3.96	1.77	1.88
0.04	5.59	3.09	3.77
0.05	7.60	4.74	5.31
0.06	8.98	6.13	7.31
0.07	10.74	7.52	8.76
0.08	11.45	9.13	10.21
0.09	13.37	9.92	11.37
0.10	13.53	11.24	12.26

络好,在小干扰下模型能保持较低的误判率,当噪声水平在0.05以下时,误判率在4.74%以下,准确判别率可达到95.26%。

3 结论

(1) 通过对番茄成熟度特征的提取和分析,从番茄的摄像机透视几何出发,提出了番茄表面红色调所占着色面积比与其他色调所占着色面积比的差值作为番茄成熟度分类的主要特征,该特征能有效描述番茄的成熟程度,不受拍摄距离的影响,能适应机器人在忽近忽远的变结构环境下进行选择收获的要求。

(2) 通过模型测试和噪声水平测试表明,将着色面积比差值和色调均值作为BP网络的两输入时,模型的准确判别率和抗干扰能力都是最佳的。模型测试的准确判别率为97.5%。当噪声水平在0.05以下时,模型的准确判别率可达到95.26%,可以为番茄自动收获作业提供一定的理论参考。

参 考 文 献

- 1 Helyes Lajos, Pek Zoltan, Lugasi Andrea. Tomato fruit quality and content depend on stage of maturity[J]. Hort Science, 2006, 41(6): 1400~1401.
- 2 应义斌,饶秀勤,马俊福. 柑橘成熟度机器视觉无损检测方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 144~147. Ying Yibin, Rao Xiuqin, Ma Junfu. Methodology for nondestructive inspection of citrus maturity with machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2): 144~147. (in Chinese)
- 3 周亦斌,王俊. 基于电子鼻的番茄成熟度及贮藏时间评价的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 113~117. Zhou Yibin, Wang Jun. Evaluation of maturity and shelf life of tomato using an electronic nose[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4): 113~117. (in Chinese)
- 4 Gejima Yoshinori, Nagata Masateru, Kenji Hiyoshi. Judging of tomato maturity by utilizing a low-resolution RGB color system[C]// ASAE Annual International Meeting 2004, 2004: 7045~7053.

节约成本考虑,建议选用接近开关传感器。

5 结论

(1) 采用传感器实现了施肥机的实时定位。实验结果表明,如果网格垄长为 40 m,定位误差小于 6%,该系统可以满足垄长小于 250 m 地块作业的定位要求。如果在此定位误差条件下,增加操作单元

垄长方向划分的距离,可满足对更长地块作业的定位要求。

(2) 针对一块地(即特定的土壤条件),测得车轮在此土壤地面的累积误差校正系数为 3.39%。在施肥作业中可以直接输入这个校正系数,进行网格识别及变量施肥。此数据可作为相似的土壤条件下地轮打滑等因素引起的累积误差修正的参考。

参 考 文 献

- Price R R, Goutam Nistala. Development of an inexpensive autonomous guidance system[C]//2005 ASABE Annual Meeting, Paper No. 051139, 2005.
- Guo Linsong, Zhang Qin, Feng Lei. A low-cost integrated positioning system of GPS and inertial sensors for autonomous agricultural vehicles[C]//2003 ASABE Annual Meeting, Paper No. 033112, 2003.
- Vassallo M J, Benson E R, Kee W E. Evaluation of multispectral images for harvester guidance[C]//2002 ASABE Annual Meeting, Paper No. 021202, 2002.
- Benson E R, Reid J F, Zhang Q. Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 1 255~1 264.
- 王荣本,纪寿文,初秀民,等. 基于机器视觉的玉米施肥智能机器系统设计概述[J]. 农业工程学报, 2001, 17(2): 151~153.
Wang Rongben, Ji Shouwen, Chu Xiumin, et al. General design for corn fertilizing intelligent machine vehicle system based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(2): 151~153. (in Chinese)
- Marchant J A, Hague T, Tillett N D. Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1997, 16(2): 165~175.
- Chateau T, Debain C, Collange F, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 28(3): 243~257.
- 田泽. 嵌入式系统开发与应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005: 60~61.
- 吴才聪,马成林,张书慧,等. 精确农业倾斜网格划分及其应用[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 137~141.
Wu Caicong, Ma Chenglin, Zhang Shuhui, et al. Method and application of making leaning field grid cell in precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 137~141. (in Chinese)
- 周一鸣. 汽车拖拉机学:汽车拖拉机理论[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2000: 36~38, 55~58.

(上接第 150 页)

- 张长利,房俊龙,潘伟. 用遗传算法训练的多层前馈神经网络对番茄成熟度进行自动检测的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 153~156.
Zhang Changli, Fang Junlong, Pan Wei. Automated identification of tomato maturation using multilayer feedforward neural network with genetic algorithms(GA)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(3): 153~156. (in Chinese)
- Hahn Federico. Neural networks predict tomato maturity stage[C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 1999, 3722:394~399.
- 应义斌,章文英,蒋亦元,等. 机器视觉技术在农产品收获和加工自动化中的应用[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 112~115.
Ying Yibin, Zhang Wenying, Jiang Yiyuan, et al. Application of machine vision technique in automatic harvesting and processing of agricultural products[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3): 112~115. (in Chinese)
- 贾渊,姬长英. 农产品自动检测中的常见颜色模型[J]. 农机化研究, 2004(4): 205~208, 213.
Jia Yuan, Ji Changying. Some common color models in automatic detection of agricultural products[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(4): 205~208, 213. (in Chinese)
- 尹建军. 基于颜色差异的果实自动识别方法与双目定位技术研究[D]. 镇江:江苏大学, 2006.
Yin Jianjun. Research in automatic recognition method and localizaion technique by binocular stereo vision based on color difference between fruit and background[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)