

黄瓜采摘机器人远近景组合闭环定位方法^{*}

冯青春 袁 挺 纪 超 李 伟

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 针对黄瓜采摘机器人远景定位精度不高,以致切伤果实和茎蔓的问题,设计了一种基于机器视觉具有空间位置反馈功能的末端执行器。对温室环境下黄瓜果实采摘区域图像信息获取方法加以研究,综合 HIS 色彩空间 H 、 S 分量进行阈值分割,结合 RGB 色彩空间 G 通道边缘分布特征以及黄瓜形状特征,提取黄瓜采摘区域。基于摄像机线性透视模型,研究了采摘切割点空间定位方法,最终向采摘机械臂控制器反馈位置微调信息。采用远近景组合闭环定位方法,对采摘目标进行闭环定位,有效地解决了采摘机器人一次远景定位误差较大的问题。试验结果表明,排除温室复杂光照情况,机器人末端执行器定位精度达到 2 mm,满足采摘作业要求。

关键词: 黄瓜 采摘机器人 机器视觉 特征识别 末端定位 闭环控制

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0154-04

Feedback Locating Control Based on Close Scene for
Cucumber Harvesting Robot

Feng Qingchun Yuan Ting Ji Chao Li Wei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to improve locating accuracy of cutting point and avoid injury of fruit and stem for cucumber harvesting robot, an end-effector with special position feedback was developed based on machine vision. As the differences of H and S distribution on HIS space between cucumber and background, the thresholds was used for image segmentation. Subsequently, the region for robotic harvesting was extracted with edge detection on G channel of RGB space and shape features analysis. Upon the data from the firstly-locating system, the spatial coordinate of the cutting point was acquired with respect to the model of linear projection. The position correction was fed back to the robot controller. The results showed that the maximum error for the cutting point location was less than 2mm, which met the demands of the robotic harvesting operation.

Key words Cucumber, Harvesting robot, Machine vision, Feature recognition, Terminal locating, Feedback control

引言

由于工作于复杂农业环境中,果实特征信息的准确提取和末端执行器的精确定位,是目前果蔬采摘机器人发展过程中的两大技术瓶颈。目前,国内外采摘机器人对采摘目标多数采用一次远景定位方

式^[1-5],对黄瓜等中小型果实定位误差可达 7.5 mm^[4],除此以外采摘机械臂末端定位误差、末端执行器接近过程中造成采摘目标的移动等因素使得一次远景定位不能满足采摘精度要求,容易导致果实抓取失败甚至切伤果实和作物茎蔓。为提高末端执行器对果实采摘精度,需要对上述误差因素进

收稿日期: 2010-04-14 修回日期: 2010-05-25

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z222)和高等学校博士点专项科研基金资助项目(200800191014)

作者简介: 冯青春,硕士生,主要从事机器视觉、农业机器人技术研究,E-mail: fengqingchun@gmail.com

通讯作者: 李伟,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉检测、农业机器人技术研究,E-mail: liww@cau.edu.cn

行补偿校正。本研究基于近景信息二次定位方式,对末端执行器定位进行闭环控制,以有效减少采用一次远景定位的机器人作业误差^[6~9];通过获取采摘区域近景图像信息,计算采摘切割点空间坐标,实现末端执行器对黄瓜采摘切割点位置的快速微调,保证对黄瓜果实切割抓取精度。

1 试验系统

黄瓜采摘机器人末端执行器如图 1 所示,采用气动式柔性手爪对黄瓜果柄进行夹持,切刀安装于手爪上方,由旋转气缸驱动切断果梗,实现黄瓜果实与作物植株分离。选用 CAMERAY 公司 CM-S4100C 型彩色 CCD 微型摄像机,将其安装于末端执行器手爪和切刀正上方,用于采集黄瓜果实顶端采摘区域近景图像。采摘机械臂控制器根据初次远景双目视觉^[5]定位信息,控制末端执行器向黄瓜果实顶端采摘区域靠近,到达果实附近已知空间位置,触发摄像机采集当前帧图像。提取黄瓜采摘切割点并计算其空间坐标,向采摘机械臂控制器反馈空间位置微调量,调整末端执行器准确切割果梗,完成收获。

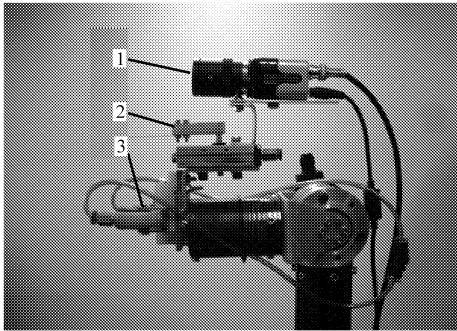


图 1 采摘机器人末端执行器
Fig. 1 End-effector of harvesting robot
1. 彩色 CCD 2. 切刀 3. 手爪

2 采摘区域近景图像信息获取

2.1 图像特征分析

温室环境光照复杂,阴影、强反射等对视觉信息提取造成极大干扰,为减少太阳光照强度影响,在温室顶部加盖遮阳膜,使温室内光强低于 12 000 lx,以有效保证温室内光照强度均匀。图 2a 为温室环境下彩色 CCD 摄像机拍摄的黄瓜顶端采摘区域近景图像,果柄顶端向上 10 mm 处为采摘切割点。背景物体包括叶片、茎蔓、天空、土壤等。黄瓜与茎叶为相近色系目标,采用 RGB 色彩空间分割目标难度较大;相对茎叶、天空等背景,黄瓜形状独特且色彩较暗,边缘轮廓明显。

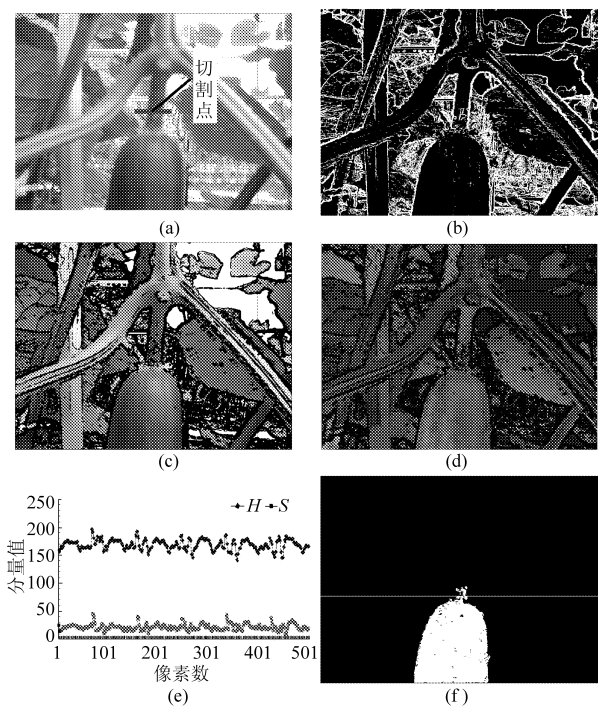


图 2 黄瓜切割点提取

Fig. 2 Cucumber cut-off point extraction
(a) 黄瓜采摘区域近景图像 (b) 边缘分布图像
(c) 边缘蒙版叠加 (d) HIS 色彩空间显示效果
(e) H 、 S 分量分布统计 (f) 分割点提取效果

2.2 采摘切割点提取

根据黄瓜目标成像特征采用边缘检测、HIS 空间阈值分割结合黄瓜形状特征可有效去除背景干扰,提取黄瓜顶端采摘切割点。黄瓜采摘区域提取步骤如下:

- (1)RGB 色彩空间 G 通道图像中黄瓜与背景叶片具有最大灰度突变,采用 Robert 边缘检测算子处理 G 通道图像,得到黄瓜及背景干扰的边缘分布特征图像(图 2b)。
- (2)将此结果作为蒙版覆盖到原始彩色图像(图 2c),将图像转换到 HIS 色彩空间并将色调(H)、饱和度(S)通道分量映射到 0 ~ 255 灰度范围(图 2d),由 20 幅黄瓜近景图像统计黄瓜区域 500 像素点分布情况(图 2e),可得黄瓜区域 H 、 S 色彩分量主要集中在(160,180)、(10,30)区域,因此综合 H 与 S 分量阈值可以有效实现黄瓜区域分割。
- (3)针对阈值处理得到二值图像中存在的噪声,通过区域标记选择最大面积部分及外接矩形长宽比 $A = L/W$ 满足(1.3,2.5)范围的区域作为黄瓜采摘区域,其他为干扰噪声,最终得到黄瓜采摘区域(图 2f)。
- (4)设确定的黄瓜目标区域像素为(i,j),自下向上每 10 行像素高度区域 m 进行黄瓜区域像素数累加,若 n_i 为第 i 行黄瓜采摘区域像素数,则各区域

总和 $N_m = \sum_{i=10m}^{10(m+1)} n_i$ 。试验表明当摄像机与黄瓜采摘区域相距 50 mm,若 N_m 小于 200,则记为 $N_{\min}$,认为黄瓜区域分布在最高区域 $m_{\max}$,采摘切割点存在于该高度区域,并把该区域黄瓜像素最高中心点作为采摘切割点图像坐标 $(\mu, \nu) = \left(\frac{1}{N_{\min}} \sum_{i=10m_{\max}}^{10(m_{\max}+1)} j, 10(m_{\max} + 1) \right)$ 。

3 采摘切割点坐标计算

3.1 图像获取空间点坐标确定

为保证黄瓜采摘区域进入摄像机视场,根据采摘机器人双目视觉远景定位系统确定的采摘切割点空间坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ,控制机械臂末端执行器运动到达采摘切割点附近空间点 (X_1, Y_1, Z_1) ,该点使得摄像机能相距固定距离 d 正对黄瓜上端区域进行拍摄,即采摘点当前位置距摄像机坐标系 $X-Y$ 平面物理距离为常数。点 (X_1, Y_1, Z_1) 为

$$\begin{cases} X_1 = X_0 - d\cos\theta \\ Y_1 = Y_0 - d\sin\theta \\ Z_1 = Z_0 - n \\ \theta = \arctan(Y_0/X_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 n 由摄像机相对切刀安装高度决定。

3.2 摄像机坐标计算

通过目标提取算法得到黄瓜切割点图像坐标 (μ, ν) ,需要将其转换到空间坐标系,才能作为机械臂末端空间位置控制数据。通过摄像机线性透视投影模型可得,摄像机坐标下采摘切割点坐标值 (X, Y, Z) 为

$$\begin{cases} X = l_{x0}\mu - l_{x1} \\ Y = l_{y0}\nu - l_{y1} \\ Z = km \end{cases} \quad (2)$$

式中, l_{x0} 、 l_{x1} 、 l_{y0} 、 l_{y1} 、 k 为视觉系统结构参数,通过摄像机标定可以唯一确定。

3.3 空间坐标计算

机械臂采摘作业过程中,各关节转角可由关节编码器测量得到,因此末端执行器在空间坐标系位置姿态已知。由于摄像机与采摘机械臂末端固定连接,所以摄像机坐标与空间坐标系转换参数矩阵已知。采摘切割点空间三维坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 可由 (X, Y, Z) 得到

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{R}$ 、 $\boldsymbol{t}$ ——摄像机坐标系向空间坐标系变换旋转矩阵和平移向量

据此位置信息,机械臂控制器第二次对机械臂末端运动进行规划,由当前位置 (X_1, Y_1, Z_1) 向 (X_w, Y_w, Z_w) 点运动,使得末端切刀能够在采摘切割点处准确切断果梗,完成采摘,从而校正系统总体误差,使得抓取切割更加准确。

4 试验结果与分析

为了验证本末端闭环定位控制系统的精度和稳定性,在温室环境下采摘机器人连续对 10 个随机分布的黄瓜目标进行采摘,同时用 FaroArm-Platinum 关节式三坐标测量仪对识别到的切割点坐标点进行测定。对比试验结果如表 1 所示,其中 8 个果实切割准确,切刀定位误差小于 2 mm,没有出现切伤黄瓜或茎蔓的现象。第 6、8 组 2 个果实采摘切割点 Z 轴坐标值定位误差较大,造成误差主要原因是:①由于温室环境光照复杂,图像信息表征不稳定对目标阈值分割算法造成影响。②黄瓜、茎叶等近色系物体叠加、遮挡现象使得黄瓜果实轮廓信息不完整。

表 1 试验结果统计
Tab.1 Experiment results mm

序号	坐标仪测定 (X, Y, Z)	试验测量结果 (X_w, Y_w, Z_w)
1	(754.15, 0, 427.10)	(754.69, 0.80, 426.46)
2	(650.75, 100.23, 427.55)	(650.56, 100.95, 427.45)
3	(600.21, 150.55, 350.75)	(601.85, 150.20, 350.23)
4	(700.97, 300.85, 100.45)	(701.50, 302.00, 98.05)
5	(600.76, 300.45, 400.36)	(600.52, 300.78, 401.80)
6	(700.78, -200.65, 100.75)	(702.05, -200.20, 102.95)
7	(750.79, -100.54, 100.18)	(750.05, -101.95, 100.80)
8	(650.21, -100.85, 400.65)	(650.95, -100.76, 405.95)
9	(700.79, -200.56, 200.79)	(700.85, -199.50, 200.05)
10	(700.50, 0, 200.46)	(701.85, 0.15, 200.95)

5 结论

- (1)将摄像头安装于采摘机器人末端执行器对黄瓜采摘区域进行近景定位,使得采摘机器人末端定位形成闭环控制,有效提高机器人作业精度,防止切伤果实和茎蔓。
- (2)通过黄瓜采摘区域 H 、 S 分量阈值分割,结合 G 通道边缘特征及黄瓜形状特征,有效实现温室复杂环境下黄瓜采摘区域提取,据此区域确定黄瓜切割点。
- (3)根据采摘机器人初次远景定位数据,通过摄像机线性投影模型以及坐标转换算法,实现对黄

瓜采摘切割点精确空间定位。

(4)对采摘机器人远景定位系统进行补充,实

现了末端执行器的精确定位,试验结果表明,排除温

室复杂光照影响特殊情况,末端执行器定位精度达

到 2 mm,满足采摘作业要求。

参 考 文 献

1 Huanyu Jiang. Measurement of 3-D locations of ripe tomato by binocular stereo vision for tomato harvesting [C]. ASABE Annual International Meeting, Paper Number 084880, 2008.

2 Paula Tarrío. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision [C]. Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, Publication Number 701P0606, 2006.

3 Naoshi Kondo. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture [C]. ASAE Annual International Meeting, Paper Number 053138, 2005.

4 van Henten E J. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003,86(3): 305 ~ 313.

5 袁挺,李伟,谭豫之,等. 温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]. 农业机械学报,2009,40(10): 151 ~ 155.
Yuan Ting, Li Wei, Tan Yuzhi, et al. Information acquisition for cucumber harveating robot in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(10):151 ~ 155. (in Chinese)

6 Kondo N, Nishitsuji Y, Ling P P, et al. Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(6):2331 ~ 2338.

7 van Henten E J, Hemming J, van Tuijl B A J, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots,2002,13(3):241 ~ 258.

8 Duke M. Feedback control of manipulator using machine vision for robotic apple harvesting[C]. ASAE Annual International Meeting, Paper Number 053114, 2005.

9 Blasco J. Robotic weed control using machine vision[J]. Biosystems Engineering,2002,83(2): 149 ~ 157.

(上接第 179 页)

11 Campbell G S. An introduction to environmental biophysics[M]. New York: Springer, 1977: 159.

12 Monteith J L, Unsworth M H. Principle of environmental physics[M]. 2nd ed. London: Edward Arnold,1990: 291.

13 吴德铭,郜治. 实用计算流体力学基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2006: 121.

14 Miguel A F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations [J].Energy Building, 1998, 28(1):63 ~ 69.

15 Brundrett E. Prediction of pressure drop for incompressible flow through screens [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1993, 115(2):239 ~ 242.

16 丁为民,汪小岳,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报,2009,40(5):162 ~ 168.
Ding Weimin, Wang Xiaochan, Li Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):162 ~ 168. (in Chinese)