

温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取^{*}

袁挺¹ 李伟¹ 谭豫之¹ 杨庆华² 高峰² 任永新¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

2. 浙江工业大学机械制造及自动化教育部重点实验室, 杭州 310032)

【摘要】 研究基于近红外图像的黄瓜果实与茎叶的信息表达方法,有效实现了近色系生物信息的图像识别。分析了黄瓜采摘深度图像信息的特点,通过建立基于灰度相关与极线几何相结合的匹配策略实现了双目视觉下的黄瓜抓取点的立体匹配和三维重建。研究温室环境下不同时间光照强度变化特点,建立了光照分析模型,提高了不同光照条件下的导航线提取的适应性。试验表明机器人视觉系统能有效识别、定位果实的空间位置,定位误差控制在 ± 5 mm以内。

关键词: 温室 机器人 黄瓜采摘 机器视觉 信息感知

中图分类号: TP391.41; TP242.6⁺²

文献标识码: A

Information Acquisition for Cucumber Harvesting Robot in Greenhouse

Yuan Ting¹ Li Wei¹ Tan Yuzhi¹ Yang Qinghua² Gao Feng² Ren Yongxin¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract

By analyzing characteristic information of depth image for robotic fruit-picking, a combinatorial optimization matching algorithm based on epipolar geometry and gray correlation constraints was discussed, to improve target precision with convergent binocular stereovision system. Furthermore, a light analysis model was established by comparing the influence of illumination intensity variation on the navigation detection under different time scale, which was beneficial to the processes of robotic autonomous navigation. The experimental results showed that the visual system can detect the target of cucumbers with the positioning error in a ± 5 mm range.

Key words Greenhouse, Robot, Cucumber harvesting, Machine vision, Information perception

引言

采摘机器人信息获取技术是利用多传感器融合的方式,实现非结构环境下的信息获取、识别定位与自主导航,是机器人智能化的关键技术。近年来,国内外许多学者对此进行了研究,以机器视觉为主的机器人信息感知已成为现代农业信息技术领域的研究热点^[1~5]。国内相关研究刚刚起步,在苹果、柑桔等收获信息处理方面进行了有意义的探索^[6~7]。

国内外对自然环境下基于机器视觉的机器人信息获取研究尚处于试验探索阶段,其主要问题在于农业机器人工作在非结构环境中,光照条件不可预知、目标背景信息叠加多义、作业空间复杂多变,这都成为信息感知技术上的瓶颈。本文针对温室黄瓜作物的种植方式和环境特点,研究将光谱技术、图像技术应用到收获机器人的视觉检测中,实现采摘信息有效获取与识别、果实空间位置表征及机器人自主导航控制。

收稿日期: 2008-09-27 修回日期: 2008-11-06

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z222)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200800191014)和浙江省机械电子工程重中之重学科开放基金资助项目(2009EP025)

作者简介: 袁挺, 博士生, 主要从事光谱学、机器视觉、农业机器人技术研究, E-mail: swwwf@tom.com

1 基于近红外图像黄瓜采摘信息获取

黄瓜果实与茎叶的颜色相近,很难用普通视觉传感器获取果实信息。本研究采用基于近红外光谱图像技术的黄瓜特征信息提取方法,即利用黄瓜与茎叶在近红外光谱区域不同的分光反射特性进行光谱成像,根据近红外图像中黄瓜特有的性状特征来完成目标与背景的有效分离,应用双目立体视觉的测距原理实现果实目标的准确定位。

1.1 黄瓜光谱特性分析

由于黄瓜作物内部成分及外部特性的不同,各组织在特定波长区域会呈现较大的光谱反射差异。根据这一特征获取的光谱图像,果实与叶、花存在不同的灰度信息,从而在一定程度上减少了果实目标的识别难度。图1为黄瓜果实、叶、花分光反射特性曲线图。从光谱反射趋势看,在可见光波段(350~700 nm)各组织的反射率普遍较低,而在近红外波段(750~1 200 nm)光谱吸收较弱。比较黄瓜各组织的光谱差异,在500~700 nm区域黄瓜果实的反射率介于叶正、背面间,而在750~900 nm范围果实反射率比其他组织高出20%以上,且该段光谱各反射率几乎保持不变,利用该波长获取的近红外图像能很好地检测出果实目标。

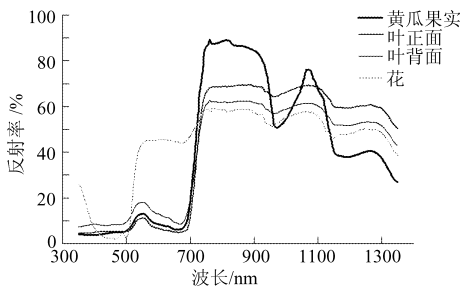


图1 黄瓜果实、叶、花光谱反射率曲线

Fig. 1 Spectral reflectance of cucumber fruit, leaf and flower

1.2 近红外黄瓜图像识别

采摘对象为中国农业大学上庄实验站处于结果期的温室黄瓜(品种为“津绿3号”)。使用高感光度黑白摄像机(美国Uniq公司的UM-300型,感光范围为350~1 200 nm)安装滤光设备(带通干涉滤光片,中心波长830 nm、半带宽70 nm)的方式进行近红外敏感波段成像。近红外图像通过采集卡(Matrox)输入处理器,采集过程中摄像机、采集卡的参数设置和镜头焦距($f = 6 \text{ mm}$)保持恒定不变。图2a即为敏感波段的黄瓜近红外图像。

以果实与背景形状差异结合局部最大类间方差取阈值对黄瓜图像进行自适应阈值分割,能有效解决环境因素对图像质量的影响。根据黄瓜近红外图像的特点,果实对应的灰度值高于背景和噪声,且黄

瓜多呈细长形、垂直地面生长,可以利用区域像素分布与灰度分布差异从图像中划分出果实目标潜在区域。首先进行图像的直方图均衡化处理(图2b),完成像素点的尺度拉伸,使图像对比度增大、灰度分布趋于均衡。按列累加图2b的灰度值,获得列像素灰度累加直方图(图2c)。经统计,如有连续20列的像素灰度累加值大于115 000,则认为图中该区域疑似有黄瓜果实存在,设果实目标潜在区域是一个以连续列中像素灰度累加和极大值所在列为为中心的 80×576 像素的图像块,如图2d所示。

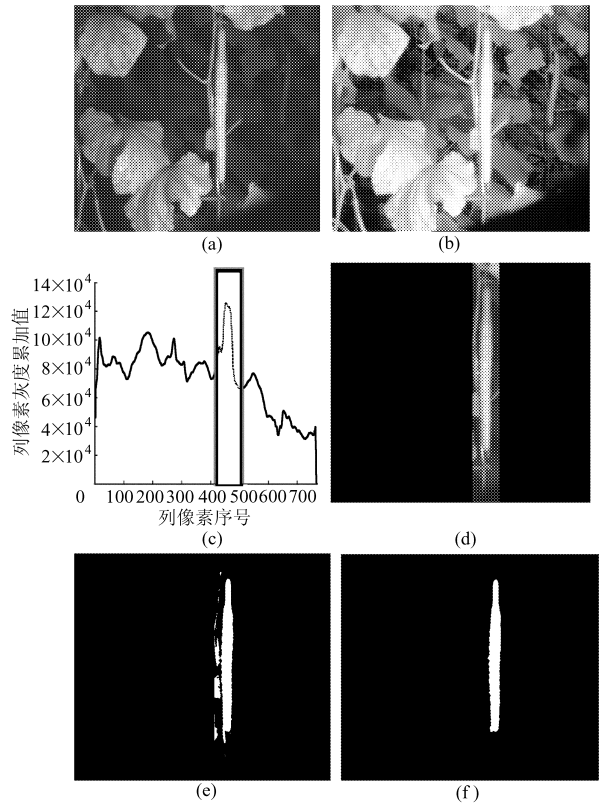


图2 近红外黄瓜图像的分割

Fig. 2 Segmentation of cucumber near-infrared image

(a) 近红外图像 (b) 均衡化图像 (c) 列像素灰度累加直方图
(d) 区域图像 (e) 区域阈值分割效果图 (f) 目标提取结果

对于区域图像,当目标在该处理区间占有适当比例时,采用局部最大类间方差阈值法能达到较好的分割效果。其基本思想是利用图像局部区域灰度直方图,依据类间距离极大准则来确定区域分割门限,假定灰度值 t 为分割阈值,则背景类与目标类可分别表示为 $\{0 \leq f(i, j) \leq t\}$ 和 $\{t < f(i, j) < G\}$,记 $f(i, j)$ 为图像局部区域内 (i, j) 点处的灰度值, G 为灰度级数。由最大类间方差准则求得两类最佳分离状态阈值

$$T = \text{Arg} \max_{0 \leq t < G} |\omega_0(t)(u_0(t) - u)^2 + \omega_1(t)(u_1(t) - u)^2| = \text{Arg} \max_{0 \leq t < G} |\omega_0(t)\omega_1(t)(u_0(t) - u_1(t))^2| \quad (1)$$

式中 $w_0(t)$ ——背景类像素数占区域图像比例
 $u_0(t)$ ——背景类像素灰度均值
 $w_1(t)$ ——目标类像素数占区域图像比例
 $u_1(t)$ ——目标类像素灰度均值
 u ——区域图像灰度均值

图 2e 是局部最大类间方差阈值分割效果图。为进一步判定区域图像内有无果实,对图 2e 进行区域标记,保留最大面积标记块,依据成熟果实外形特征,满足面积 $(12\ 522 \pm 1\ 500)$ 像素、圆形度 0.255 ± 0.15 、矩形度 0.391 ± 0.3 参数条件的标记块确定为果实目标(图 2f)。同时为使机械手在收获时不损坏果实表面性状,其抓取位置应为靠近果实根蒂的无毛刺部分,经统计标记块上部约 1/4 区间为最佳抓取区域。

1.3 果实目标空间定位

对采摘机器人视觉系统而言,不仅要获取目标的二维信息,而且要计算采摘目标的空间位置,从而引导机械手进行准确的黄瓜采摘。本研究采用基于双目立体视觉技术,先从左、右图像提取二维候选特征进行立体匹配,后根据视差原理恢复出目标三维几何信息。

1.3.1 目标特征的立体匹配

由于噪声、光照、遮挡和透视畸变等因素的影响,果实空间定位点投影到 2 个摄像机图像平面上形成的对应点的特性可能不同,即在一幅图像中的一个特征点或者一小块图像,在另一幅图像中可能存在几个相似的候选匹配。因此需要信息或者约束作为辅助判据,以便得到唯一准确的匹配。本研究根据黄瓜特点,采用一种基于灰度相关与极线几何相结合的匹配策略来完成抓取点的立体匹配。

首先,分别获取左、右图像的果实抓取区域形心作为抓取点候选特征,并在右图像建立以抓取点为中心、大小为 40×80 像素的匹配区域。把左图像中以抓取点为中心的 $m \times m$ 大小窗口称作基准邻域窗,在右图像匹配区域内,以灰度互相关函数作为搜索窗口与基准邻域窗进行相似性测度。设 I_L 和 I_R 分别为双目立体视觉中左、右图像的灰度值, \bar{I}_L 和 \bar{I}_R 为对应邻域窗的灰度平均值,故相关性函数可定义为

$$S(x, y) = \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=0}^{m-1} (I_L(i, j) - \bar{I}_L)(I_R(x+i, y+j) - \bar{I}_R) \quad (2)$$

这里,采用迭代方法来确定 $S(x, y)$ 的阈值,当左、右图像匹配的对应点数量小于某个值时,迭代结束并保存候选对应点。通过灰度相似性测度,有效

地减少了候选点数量,为后续处理带来更高的匹配精度与匹配速度。

为了进一步缩小匹配范围,候选匹配点将在极线几何约束指导下进行对应性测试。由摄像机标定获得的内外部参数,可以得到左图像抓取点在右图像的对应极线。根据极线约束原理,匹配点一定位于相应图像的极线上,在考虑误差存在的前提下,右图像候选匹配点与所得极线的垂直距离小于 0.5 像素就认为能够满足匹配要求。当然,经过上述处理仍有可能存在不止一个匹配对时,利用候选点与匹配区域中心距离最短的原则,最终求取抓取点在左、右图像上唯一对应的匹配关系,如图 3 所示。

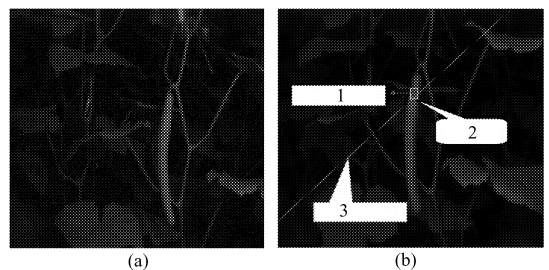


图 3 立体匹配图像对

Fig. 3 Pairs of cucumber images taken with the stereovision system

(a) 左图像 (b) 右图像

1. 抓取点 2. 匹配区域 3. 极线

1.3.2 抓取点的空间坐标计算

基于左、右图像抓取点的视差,由三角法原理进行三维信息计算。图 4 给出了双目视觉传感器三维坐标测量数学模型,设左摄像机位于测量坐标系 $Oxyz$ 的原点且无旋转,图像坐标系为 $O_LX_LY_L$,有效焦距为 f_l ;右摄像机坐标系为 $O_r x_r y_r z_r$,图像坐标系为 $O_r' X_r Y_r$,有效焦距为 f_r 。由摄像机透视变换模型可以推出抓取点三维坐标为

$$\begin{cases} x = zX_l/f_l \\ z = \frac{f_l(f_l t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} \\ y = zY_l/f_l \end{cases} \quad (3)$$

其中, $r_1, r_2, r_3, r_7, r_8, r_9, t_x, t_z$ 为双目立体视觉系统的外部参数,由系统标定获得。因此,只要求出 f_l, f_r 和抓取点的左、右图像坐标,就可以完成果实目标的三维空间定位。

1.4 试验结果与分析

试验处理了 60 幅不同距离拍摄的近红外黄瓜图像,测量数据如图 5 所示。图中横坐标为激光测距仪测量结果,纵坐标为立体视觉算法计算结果,定位误差控制在 ± 5 mm 以内(这里误差为双目视觉测

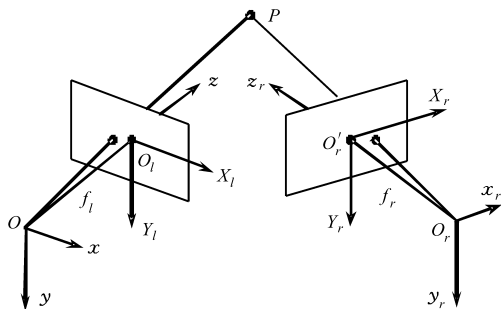


图4 双目视觉传感器三维坐标测量数学模型
Fig.4 3-D reconstruction model of stereovision

量结果与激光测距值之差)。误差原因分析:①由于抓取点是空间点,无法实现立体视觉算法处理的点与测距仪的定位点绝对重合。②双目摄像机的内外参数由系统标定所得,标定结果不可避免的存在一定误差。③黄瓜采摘信息获取过程中,各处理识别算法形成的误差。

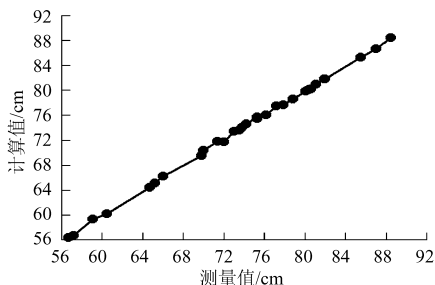


图5 实际测量距离与双目视觉测距间的关系曲线
Fig.5 Relationship between measured distance and detected distance

2 温室环境下机器人导航信息处理

本研究分析的是温室环境下机器人行走路径的图像信息,导航线如图6所示,路面经过硬化处理。采摘机器人依靠云台摄像机获取路面图像,并从中识别出红色导航线,根据导航线提供的路径信息,驱动机器人循线行走。

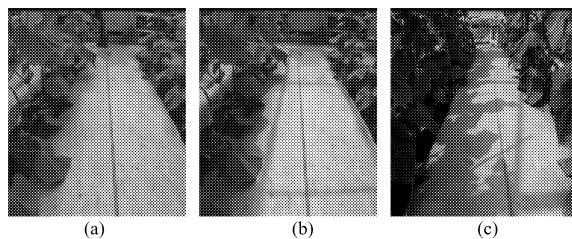


图6 不同时刻拍摄的图像

Fig.6 Image acquisition under different time scale
(a) 7:00 (b) 11:00 (c) 14:00

2.1 路径图像信息分析

路径图像处理是整个机器人导航的基础,能否获取实时有效的图像信息对导航系统起着决定性作用。图像的路径特征提取依赖于图像分割后的结

果,常用的方法是通过基于颜色特征进行图像分割。但对于日光温室条件下的道路环境,阴影噪声复杂、光照强弱不一,这为视觉系统正确识别目标带来难度。针对这一问题,拍摄了不同时间温室路面图像,以进行对比试验。对照图6中的3幅图像,可以发现目标和背景之间并不具有截然不同的灰度,随着天气情况的不同,阳光照射角度和强度的变化,目标和背景的亮度均要发生变化,因此需要选择一种对光照适应能力强的阈值方法来提高视觉系统的处理稳定性。

2.2 导航线提取

在大量试验的基础上,选用基于矩不变自动阈值法提取导航路径,可一定程度地抑制光照对颜色信息的影响。实现步骤如下:

(1)对图7a所示彩色原始图像进行灰度化处理,即

$$G_1 = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (4)$$

得到灰度图像,如图7b所示。

(2)利用矩不变自适应阈值分割算法对灰度图像中路面和植物体信息进行初步分割。矩不变阈值分割法是从统计学的角度把矩法用于图像的分割,其基本思想是:使阈值分割前后,图像的矩保持不变。矩不变阈值法的运算速度较快,分割出的目标轮廓鲜明,有利于后续处理,其效果如图7c所示。

(3)把阈值分割后的二值图像作为蒙版覆盖到原始彩色图像上。彩色图像中对应于二值图像白色区域部分被覆盖(像素亮度值为255),其余部分保持原像素值不变,得到图7d所示图像。经过这一步骤操作后,既去除了植物体对提取红色导航线的干扰,又保留了原始图像中红色的导航线信息。

(4)提取红色导航线,为了减小自然光照的影响,对R、G、B分量进行规格化处理

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R + G + B} \\ g = \frac{G}{R + G + B} \\ b = \frac{B}{R + G + B} \end{cases} \quad (5)$$

得到r、g、b作为特征参数来进行研究。经过大量研究发现,图像中红色导航线部分的r分量值明显高于g分量和b分量,对图7d提取导航线得

$$P_g = \begin{cases} 255 & (r - g > 0.17 \text{ 且 } r - b > 0.19) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

结果如图7e所示。

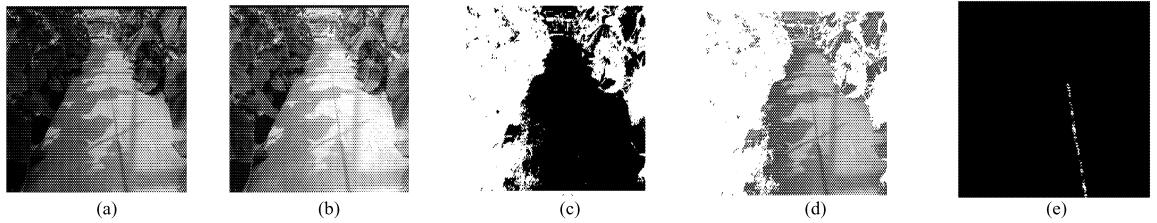


图 7 提取导航线的分步图像

Fig. 7 Processing of navigation-line extraction

(a) 原始图像 (b) 灰度图像 (c) 阈值分割处理 (d) 蒙版叠加后的图像 (e) 导航线提取结果

2.3 试验结果与分析

为验证上述算法的可靠性与稳定性,对图 6 所示 3 个时段拍摄的导航路面图像分别进行处理,提取导航线结果如图 8 所示。试验结果表明,该方法对于不同光线条件下的导航线提取具有良好的适应性。

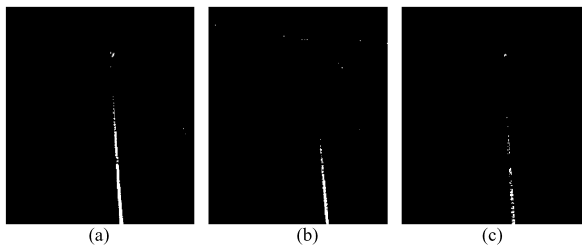


图 8 图像蒙版加 rgb 分量线性组合法提取导航线结果

Fig. 8 Result of navigation-line acquisition by image masking and linear combination of rgb color space

(a) 7:00 (b) 11:00 (c) 14:00

3 结论

(1) 采用基于近红外光谱特征的图像获取技术,有效地分离黄瓜果实与茎叶的信息,对近色系生物信息的图像识别具有良好的应用可行性。

(2) 提出果实与背景形状差异结合局部最大类间方差取阈法对黄瓜图像进行两次动态阈值分割,解决了环境因素对图像质量的影响,实现黄瓜目标的准确识别。

(3) 通过建立基于灰度相关与极线几何相结合的匹配策略实现了双目视觉下的黄瓜抓取点的立体匹配,并根据视差原理恢复出目标三维几何信息,为机械臂运动提供依据。

(4) 研究了温室环境下不同时间光照强度变化特点,建立了光照分析模型,提高了不同光照条件下的导航线提取的适应性。

参 考 文 献

- 1 Fujiura T, Ueda K, Hymn Ch S, et al. Vision system for cucumber harvesting robot[C]//IFAC Bio-robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bio-production Systems, Sakai, Osakam Japan, 2000: 61~65.
- 2 Arima S, Kondo N. Basic studies on cucumber harvesting robot[C]//Proceedings of ARBIP95, Japan Society of Agricultural Machinery, 1995(1): 195~202.
- 3 Arima S, Kondo N. Cucumber harvesting robot and plant training system[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1999, 11(3): 208~212.
- 4 Kondo N, Nakamura H, Monta M, et al. Visual sensor for cucumber harvesting robot[C]//Proceedings of the Food Processing Automation Conference III, 1994: 461~470.
- 5 Van Henten E J, Van Tuijl B A J, 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.
- 6 蔡健荣,范军,李玉良. 立体视觉系统标定及成熟果实定位[J]. 农机化研究, 2007(11): 38~40.
Cai Jianrong, Fan Jun, Li Yuliang. Stereovision calibration and mature fruit location on nature scene[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(11): 38~40. (in Chinese)
- 7 李明喜,毛罕平,张艳诚. 基于提升小波和分形的苹果树多源图像融合算法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 91~93.
Li Mingxi, Mao Hanping, Zhang Yancheng. Fusion algorithm for multi-sensor images based on lifting wavelet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 91~93. (in Chinese)