

# 基于光谱成像技术的温室黄瓜识别方法\*

袁挺 纪超 陈英 李伟 张俊雄

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**【摘要】** 为实现温室环境下近色系果蔬的采摘识别,提出了一种基于统计方差结合人工神经网络的光谱选择方法对黄瓜敏感波段进行分析验证,并将选定的光谱组合作为温室黄瓜识别中光谱图像获取的参考依据。结果表明,利用所摄敏感波段的图像信息可有效地解决黄瓜目标与背景的区别问题。综合比较黄瓜作物(果实、叶、花)在不同光谱域的分光反射特性差异,利用方差分解方法获取果实信息的敏感波段,在敏感区域内进行主成分分析,将前4个主成分作为网络输入、作物器官类别作为输出,建立3层BP-ANN验证模型。将160个样本数据按比例分为建模集和预测集,模型对建模集120个样本的正确判别率为100%,对预测集40个样本的正确判别率为95%。说明敏感波段的选择能较好地反映黄瓜作物不同器官间的特性差异。

**关键词:** 温室黄瓜 光谱成像 波段选择 神经网络

**中图分类号:** S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)S0-0172-05

## Greenhouse Cucumber Recognition Based on Spectral Imaging Technology

Yuan Ting Ji Chao Chen Ying Li Wei Zhang Junxiong

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

### Abstract

In order to realize the recognition and harvesting of the similar-color fruits, a spectrum selected method was developed to analyze and verify sensitive bands of cucumber based on statistical variance analysis and artificial neural network. Then the selected spectrum composition was used as reference basis for spectral image acquisition in greenhouse cucumber recognition, and the results of image processing indicated that the images within sensitive bands were captured to cope with the similar-color segmentation problem under complex environment effectively. By comparing the spectral reflectance difference of cucumber plant (fruit, leaf and flower) from visible to infrared region (350 ~ 1 200 nm), sensitive bands of fruit information were obtained by statistical variance analysis. After that, principal component analysis compressed the sensitive bands into several new variables that were the linear combination of original spectral data. In order to set up the three layer verifying model of back propagation artificial neural network (BP-ANN), the first four PCs (principle components) were applied as inputs of BP-ANN, and the values of type of cucumber organs were applied as outputs. In this model, the trained network arrives at a 100% identification rate for 120 training samples as well as a 95% identification rate for 40 test samples. It proved that the selected spectrum composition could better reflect the characteristic difference of cucumber organs.

**Key words** Greenhouse cucumber, Spectral imaging, Wavebands selection, Neural network

收稿日期: 2011-08-15 修回日期: 2011-09-25

\* 国家自然科学基金资助项目(31071320, 31101079)、农业科技成果转化基金资助项目(2011GB23600020)、高等学校博士点专项科研基金资助项目(20090008110007)和教育部博士点新教师类基金资助项目(200800191014)

作者简介: 袁挺, 博士生, 主要从事农业机器人、机器视觉技术研究, E-mail: jicobear@163.com

通讯作者: 张俊雄, 副教授, 主要从事农业机器人技术研究, E-mail: cau2007@cau.edu.cn

## 引言

光谱成像技术是指利用一个或多个光谱通道进行图像采集、显示、处理和分析解释的技术,是成像技术与光谱分析的有机结合。随着现代农业的发展,融合光谱域与空间域信息的光谱成像技术在果蔬自动采收识别和品质检测方面得到了蓬勃发展,已经成为农业信息技术领域的一个研究热点<sup>[1-5]</sup>。

由于光谱成像既反映对象内部化学成分,又表现目标外部的特征分布,因此国内外的专家学者在该领域进行了不少研究和应用<sup>[6-13]</sup>。

利用作物在不同波长光谱图像所呈现特有的性状特征,可有效地实现目标信息的表达与检测。对于温室环境下的黄瓜作物,各器官在不同波长光线照射下也会产生不一的分光反射特性,这就需要对原始光谱数据作深入研究,分析其光谱特征并找出敏感波段。本文用光谱分析方法来确定表达黄瓜果实信息的最佳光谱波段,以便增加相应光谱图像目标和背景的灰度对比,为后续的图像处理及果蔬识别奠定基础。

## 1 材料与方方法

### 1.1 实验材料

实验于2008年6月在中国农业大学上庄实验站日光温室进行,栽培的黄瓜品种为津优3号。根据采摘要求,瓜条长度为300~350 mm、质量为200~220 g、弯曲度小于20 mm的单瓜市场价值最高,因此本实验采用上述尺寸果实及所对应的功能叶作为主要实验对象。

### 1.2 图像获取

采用特定的黑白摄像机加滤光片的方式进行光谱成像。成像设备为美国Uniq公司的UM-300黑白摄像头,感光波段为350~1 200 nm,光敏感度是普通摄像头的4倍,感光面板的分辨率为768×576,适用于温室黄瓜果实识别作业。光谱图像通过采集卡(Matrox)输入计算机,采集过程中摄像机、采集卡的参数设置和镜头光圈的大小保持恒定不变。

### 1.3 光谱获取

采用美国ASD公司的FieldSpe Pro FR™手持式光谱仪采集结果期黄瓜作物(果实、叶、花)的光谱数据,传感器探头垂直向下,视场角为25°,采样高度约20 mm。光谱仪波段范围350~2 500 nm,间隔1 nm,受成像设备感光波段限制,实验只研究350~1 200 nm波段范围内的反射光谱。测量时随机扫描20次取平均值作为该目标的光谱反射率,测定前、后均进行专用参考板校正,参考板与被测对象处同

一水平。

### 1.4 波长选择方法

采用基于方差差异分析的波长选择方法,此方法能较好反映黄瓜作物各器官间的反射光谱差异程度及差异范围,从中确定表征黄瓜果实信息的理想光谱波段<sup>[14-16]</sup>。设某一波长处 $F$ 值为

$$F = S_A / S_E \quad (1)$$

$$\text{其中 } S_A = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$S_E = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (3)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{Mn_j} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij} \quad (5)$$

式中  $S_A$ ——效应平方和,表示不同类型间光谱反射率的差异

$S_E$ ——误差平方和,表示不同类型内光谱反射率的差异

$M$ ——类别数  $n_j$ ——第 $j$ 类中的样本数

$x_{ij}$ ——第 $j$ 类中的第 $i$ 个样本光谱反射率

$\bar{x}_j$ ——第 $j$ 类光谱反射率平均值

$\bar{x}$ ——所有样本光谱反射率平均值

$F$ 值表示类别误差与随机误差的相对值,该值越大意味着类别间的光谱反射率差异越大。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 黄瓜反射光谱

图1为黄瓜作物(果实、叶、花)的典型光谱反射特性。横坐标为波长,波段范围350~1 200 nm,纵坐标为光谱反射率。从整个光谱反射趋势看,在可见光波段(350~700 nm)的反射率普遍较低,而在近红外波段(750~1 200 nm)的光谱吸收较弱,这与作物的光合作用有关,可见光的多数光线透过作物上表皮被叶绿素吸收进行光合作用,近红外光线则可以穿过叶绿素被多孔薄壁组织所反射,故在近红外波段形成强反射<sup>[4]</sup>。另外,黄瓜各器官间的光

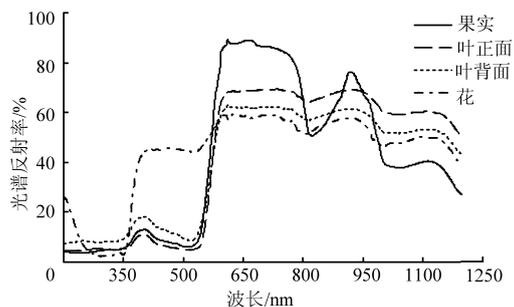


图1 黄瓜作物的光谱反射特性

Fig. 1 Reflectance spectra of cucumber plant

谱反射曲线也存在一定差异,在波段范围 500 ~ 700 nm 区域黄瓜果实的反射率低于其他器官,而在波段范围 750 ~ 900 nm 范围果实反射率要比其他器官高出 20% 以上,且该段光谱各反射率几乎保持不变,这些特征为黄瓜敏感波段的选择提供了有利条件。

## 2.2 敏感波段选择

### 2.2.1 黄瓜作物光谱差异分析

为了具体确定识别黄瓜果实的最佳波段,本研究对原始光谱数据进行方差差异分析,图 2 为黄瓜果实与叶、花反射光谱间的  $F$  值变化曲线。总体而言,黄瓜果实与花的光谱反射差异最大、叶片背面次之、叶片正面最小。特别在近红外区 780 ~ 880 nm 波段处,果实与其他器官的光谱反射差异最为明显,其  $F$  值变化曲线具有一定的特征性和指纹性,差异程度均在 20 以上;在可见光区的 650 ~ 700 nm 波段处,果实与其他器官间的  $F$  值也超过 10,且在波长 690 nm 附近出现峰值。分析表明上述两个波段能较好反映黄瓜果实与叶、花的类间光谱反射差异,可以作为原始光谱数据的敏感波段。

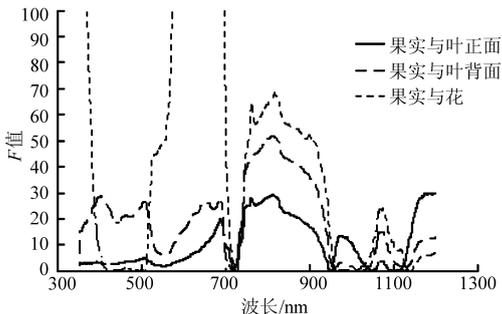


图 2 黄瓜果实与叶、花反射光谱间的  $F$  值变化曲线

Fig. 2  $F$  ratio of reflectance spectra between cucumber fruit and other organs (leaf and flower)

### 2.2.2 敏感波段的分析验证

为了验证所选敏感波段的有效性和可行性,本研究应用主成分分析和 BP 神经网络相结合的方法建立黄瓜作物器官的鉴别模型。

由于当前实验所选的两个敏感波段共有 152 个数据点,数据量相对较大,如果直接用这些数据建立神经网络模型,容易导致模型训练时间过长、难以收敛。因此先采用主成分分析法提取光谱信息中的特征变量,实现数据的降维处理,且不失原始数据的信息量<sup>[17-18]</sup>。通过对 160 个样本数据的分析,前 6 个主成分的特征值及累计贡献率如表 1 所示。累计贡献率反映了前  $n$  个主成分对原数据信息的表征能力<sup>[19]</sup>,从表中可知前 4 个主成分的累计贡献率已达到 99.86%,而前 5 个主成分累计贡献率只比前 4 个增加了 0.08%,这说明前 4 个主成分足够代表原始

光谱的重要信息,这样数据矩阵可从原始的  $160 \times 152$  减少到  $160 \times 4$  (4 个主成分)。

表 1 主成分累计贡献率

Tab. 1 PCs and reliabilities

主成分	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
累计贡献率/%	80.64	92.51	98.39	99.86	99.94	99.98

对所有样本数据按 3:1 比例随机划分建模集和预测集,则建模集的样本数为 120 个,预测集的样本数为 40 个。通过主成分分析,选择前 4 个主成分作为 BP 神经网络的输入节点,输出节点为 1 个(设置输出值 1、2、3 和 4,分别代表黄瓜果实、叶正面、叶背面和花)。经反复实验调整隐含层的节点数,建立了一个 4-9-1 的 3 层 BP 神经网络优化模型<sup>[20]</sup>,其网络误差  $\varepsilon$  为 0.01,学习速率为 0.2,最大迭代次数为 2 000。设定预测误差大于 0.3 即为误判,结果表明:鉴别模型对建模集 120 个样本的拟合残差为  $3.2076 \times 10^{-6}$ ,正确判别率为 100%;对预测集 40 个样本的正确判别率为 95% (表 2)。其中黄瓜果实和花的正确识别率达到 100%,叶正面和叶背面各有 1 个误判,这表明利用所选的两个敏感波段可以有效地鉴别出黄瓜作物中的果实信息。

表 2 BP 神经网络对建模集和预测集的鉴别结果

Tab. 2 Discrimination results for training and prediction samples by BP-ANN model

类别	建模集			预测集		
	样本数	误判数	正确率/%	样本数	误判数	正确率/%
果实	30	0	100	10	0	100
叶正面	30	0	100	10	1	90
叶背面	30	0	100	10	1	90
花	30	0	100	10	0	100
合计	120	0	100	40	2	95

## 2.3 敏感波段在光谱成像的应用

本研究采用黑白摄像机加滤光片的方法进行光谱成像,利用黄瓜作物各器官在特定光谱波段的特性差异解决近色系黄瓜目标与背景的区别问题。根据黄瓜敏感波段分析,分别选定两种型号的带通干涉滤光片(一种中心波长 680 nm、半带宽 20 nm、最大透过率 80%;另一种中心波长 830 nm、半带宽 50 nm、最大透过率 91.5%)用于获取光谱图像。图 3 为所摄图像及处理后的效果,图 3a 中黄瓜表面灰度低于多数背景元素,部分处于阴影下的叶片灰度与之较为接近;图 3b 中黄瓜灰度高于其他部分,少数叶片由于光照距离及入射角度的影响与果实区分

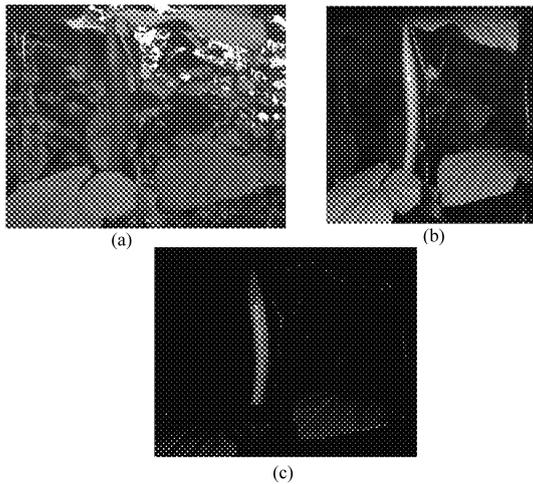


图3 光谱图像及其融合结果

Fig.3 Cucumber image of two different wavebands and mixed image

(a) 680 nm 光谱图像 (b) 830 nm 光谱图像 (c) 融合结果

不明显;图 3c 为两幅光谱图像线性相减融合后的图像,果实信息更为突出、明显,表明结合上述两种敏感波段图像的灰度差异可以有效识别果实目标,并为后续果实特征提取、采摘点空间定位提供了有利保证。

### 3 结束语

针对黄瓜作物(果实、叶、花)在特定波长的光谱反射差异,引入基于方差差异分析的波长选择方法来获取表达黄瓜果实信息的敏感波段,并应用主成分分析和 BP 神经网络相结合的策略建立敏感波段的分析验证模型,模型对未知样本的预测正确判别率达到 95%,表明选定的敏感波段能较好地反映黄瓜果实与其他器官在内部成分和外部特征上的差异。

### 参 考 文 献

- 肖松山, 范世福, 李昀, 等. 光谱成像技术进展[J]. 现代仪器, 2003, 20(5): 44~47.  
Xiao Songshan, Fan Shifu, Li Yun, et al. Progress of spectral imaging technique[J]. Modern Instruments, 2003, 20(5): 44~47. (in Chinese)
- 黄威, 王桂强, 许小京, 等. 化学成像检验技术新进展[J]. 中国司法鉴定, 2008, 10(4): 35~39.  
Huang Wei, Wang Guiqiang, Xu Xiaojing, et al. Development of chemical imaging[J]. Chinese Journal of Forensic Sciences, 2008, 10(4): 35~39. (in Chinese)
- 林伟明, 毛罕平, 王新忠, 等. 多光谱视觉技术在收获机器人中的应用[J]. 农业装备技术, 2004, 30(6): 15~18.  
Lin Weiming, Mao Hanping, Wang Xinzhong, et al. Application of multi-spectrum reflectance vision technique for harvesting robot[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2004, 30(6): 15~18. (in Chinese)
- 邱白晶, 刘保玲, 吴春笃, 等. 近红外图像处理技术在农业工程中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 102~106.  
Qiu Baijing, Liu Baoling, Wu Chundu, et al. Applications of near-infrared image processing in agricultural engineering[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 102~106. (in Chinese)
- 何东健, 杨青, 薛少平, 等. 农产品分光反射特性及近红外图像处理在农业中的应用[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 80~84.  
He Dongjian, Yang Qing, Xue Shaoping, et al. Spectral reflectance of fruits and near-infrared image processing in agricultural application[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(4): 80~84. (in Chinese)
- Kane K E, Lee W S. Multispectral imaging for in-field green citrus identification[C]//2007 ASABE Annual Meeting, Paper No: 073025, 2007.
- 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.
- van Henten E J, Tuijl B J, Hoogaker G J, et al. An autonomous robot for de-leaving cucumber plants grown in a high-wire cultivation system[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 317~323.
- van Henten E J, Dijk G, Kuypers M C, et al. IFAC modeling and control in agriculture [C] // Horticulture and Post-harvesting Processing. Wageningen, Netherlands, 2000: 39~44.
- Feyaerts F, van Gool L. Multi-spectral vision system for weed detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(6~7): 667~674.
- Ariana D P, Renfu Lu. Visible/near-infrared hyperspectral transmittance imaging for detection of internal mechanical injury in picking cucumbers[C]//2006 ASABE Annual Meeting, Paper No: 063039, 2006.
- Diwan P A, Renfu Lu. On-line hyperspectral transmittance imaging for internal defect detection of picking cucumbers[C]//2007 ASABE Annual International Meeting, Paper No: 073133, 2007.
- Xing Juan, Michael Ngadi, Wang Ning, et al. Wavelength selection for surface defects detection on tomatoes by means of a

- hyperspectral imaging system[C]//2006 ASABE Annual Meeting, Paper No: 063018, 2006.
- 14 Kleyne O, Leemans V, Destain M F. Selection of the most efficient wavelength bands for “Jonagold apple” sorting[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30(3):221 ~ 232.
- 15 张喜杰, 李民赞, 崔笛, 等. 温室作物长势的光谱学诊断方法与仪器开发[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(5): 887 ~ 890.  
Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di, et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(5): 887 ~ 890. (in Chinese)
- 16 王福民, 黄敬峰, 徐俊锋, 等. 基于光谱波段自相关的水稻信息提取波段选择[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(5): 1 098 ~ 1 101.  
Wang Fumin, Huang Jingfeng, Xu Junfeng, et al. Wavebands selection for rice information extraction based on spectral bands inter-correlation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(5): 1 098 ~ 1 101. (in Chinese)
- 17 陈建, 陈晓, 李伟, 等. 基于近红外光谱技术和人工神经网络的玉米品种鉴别方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(8): 1 806 ~ 1 809.  
Chen Jian, Chen Xiao, Li Wei, et al. Study on discrimination of corn seed based on near-infrared spectra and artificial neural network model[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(8): 1 806 ~ 1 809. (in Chinese)
- 18 蒋璐璐, 谈黎虹, 裘正军, 等. 基于可见-近红外光谱的制动液品牌鉴别方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(6): 1 296 ~ 1 299.  
Jiang Lulu, Tan Lihong, Qiu Zhengjun, et al. Discrimination of varieties of brake fluid using visual-near infrared spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(6): 1 296 ~ 1 299. (in Chinese)
- 19 邓祖新. 数据分析方法和 SAS 系统[M]. 上海:上海财经大学出版社, 2006: 291 ~ 293.
- 20 马正华, 薛国新. BP 神经网络训练算法的改进[J]. *江苏理工大学学报:自然科学版*, 2000, 21(1):79 ~ 82.  
Ma Zhenghua, Xue Guoxin. Improvement in the training algorithm of BP neural networks[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science*, 2000, 21(1):79 ~ 82. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 193 页)

- 3 刘新阳, 罗金耀, 高传昌. 滴灌用水力旋流器中颗粒分离的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2):7 ~ 11.  
Liu Xinyang, Luo Jinyao, Gao Chuanchang. Numerical simulation of particle separation in hydrocyclone for drip irrigation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2):7 ~ 11. (in Chinese)
- 4 Zhang H R, Wang X D, Zhang C J, et al. Robust identification of non-linear dynamic systems using support vector machine [C]//IEEE Proceedings—Science, Measurement and Technology, 2006, 153(3): 125 ~ 129.
- 5 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:农业科学技术出版社, 2007:675.
- 6 何雄奎, 曾爱军, 刘亚佳, 等. 水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9):76 ~ 79.  
He Xiongkui, Zeng Aijun, Liu Yajia, et al. Design and parameter test of the low volume air assistant rice boom sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(9):76 ~ 79. (in Chinese)
- 7 Joaquin Quiñero-Candela. Learning with uncertainty-Gaussian processes and relevance vector machines [D]. Lyngby: Denmark Technical University of Denmark, 2004.
- 8 Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a non-canopy condition using CFD simulation[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(6): 1 887 ~ 1 897.