

基于图像处理的土壤表层含水率在线检测方法研究

张荣标, 何加祥, 吴 涛, 冯友兵

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 土壤表层含水率是影响作物生长的重要因素, 在节水灌溉控制系统中对其进行在线检测尤为重要。运用计算机数字图像处理技术, 探索一种土壤表层含水率在线检测的新方法。通过土壤表层图像的中值滤波、图像模式转换和“坏区”过滤, 提取图像的特征参数——灰度值, 并对土壤表层图像的灰度值与其含水率的关系进行了试验研究。理论分析与试验结果表明, 土壤含水率的百分比与土壤表层图像的灰度值之间是一种近似线性的函数关系。

关键词: 土壤含水率; 在线检测; 恒虚警; 图像模式转换; 中值滤波

中图分类号: S152.75; TP274+.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)10-0057-05

张荣标, 何加祥, 吴 涛, 等. 基于图像处理的土壤表层含水率在线检测方法研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 57- 61.

Zhang Rongbiao, He Jiaxiang, Wu Tao, et al. Methods for on-line measurement of soil moisture content based on image processing technique[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10): 57- 61. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土壤表层含水率是影响作物生长的重要因素, 也是制定灌溉计划的重要依据^[1,2]。适合于田间局部范围内土壤含水率检测的方法有称重烘干法、张力计法、中子探测法、时域反射计(TDR)法等等^[3-8]。其中称重烘干法具有精度高、实现简单等特点, 但难以实现在线检测。张力计法结构和原理比较简单, 并可实现在线检测, 但探头很难与埋设处的土壤完全粘合, 且不可避免地在埋设时探头易受到损坏。中子探测法和时域反射计(TDR)法也可实现在线检测, 但价格昂贵, 其中中子探测法每台需数千美元, 并存在辐射危险。另外, 卫星遥感技术适合于大面积的土壤表层含水率普查^[9]。因此, 有必要探索一种成本低、非接触式的适合于田间局部范围内土壤表层含水率在线检测的新方法, 使土壤表层含水率的检测技术朝着低成本、非破坏、自动化的方向发展。通过对土壤表层含水信息与土壤图像特征之间的关系分析, 研究出相应的检测方法。通过土壤表层图像的在线采集, 并对土壤表层 RGB 模式的图像进行中值滤波预处理, 把 RGB 模式的彩色图像转化为 $L^* a^* b^*$ 图像模式, 最后对图像中的“坏区”进行了过滤, 提取出图像的特征参数——灰度值, 并对土壤表层图像的灰度值与其含水率的关系进行了试验研究。理论分析与试验结果表明, 土壤含水率的百分比与土壤表层图像的灰度值之间是一种近似线性的函数关系。

1 测试原理与方法

1.1 测试原理

土壤是由多种成分构成的复杂的自然综合体, 其表层图像特征会受到土壤母质、有机质、水分等多种复杂因素的影响, 其中土壤母质和有机质为不透明物质, 在可见光范围内, 若用同一光强的光源照射土壤表层, 光线几乎被全部反射, 相同的土壤其特征值保持不变。土壤为不透明物质, 在一定的入射光波段下, 其主要为反射光谱。而水体为透明物质, 土壤含水率小于土壤田间持水量时, 是以附着水的方式分布于土壤颗粒间隙中。一定波长的入射光在摄入颗粒表面和从颗粒表面反射出来时要受到水分层的吸收和散射的衰减^[10]。当含水率达到或超过土壤田间持水量时, 即水分已充分浸湿土壤, 在土壤表层形成水膜, 由于水膜产生的镜面反射对土壤表层特征产生很大影响, 这时土壤含水率已充分饱和, 这种情况不属本课题的研究范围。当土壤含水率小于土壤田间持水量时, 即水分被土壤充分吸收, 这时土壤反射率与其含水率呈明显的线性关系, 反射率随含水率的增加而降低, 两者的关系可用下式表示^[11]。

$$y = -ax + b \quad (1)$$

从可见光到近红外对土壤水分的估计多是建立在土壤湿度与反射率的关系上。因此, 土壤表层图像中像素亮度值的深浅可反映土壤含水率的多少, 图像某点的灰度值与其亮度具有一一对应的关系, 在太阳光谱范围(380~ 2500 nm)的光谱反射信息能够用于估算土壤表层水分。在可见光光谱范围内, 土壤含水率越高, 土壤图像的灰度值越小(灰度值为 0 表示黑色, 255 表示白色); 土壤含水率越低, 其图像灰度值越大。显然, 通过分

收稿日期: 2006-07-25 修订日期: 2007-04-13

作者简介: 张荣标, 教授, 主要从事农业电气化与自动化研究。镇江江苏大学电气信息工程学院, 212013。Email: zrb@ujs.edu.cn

析土壤图像的灰度值便可求得相应的含水率。

1.2 测试方法

通过图像采集装置获取土壤表层的图像,再运用计算机数字图像处理技术,提取与土壤表层含水率有关的灰度值,然后采用称重法进行标定,得到土壤表层含水率与灰度值之间的关系。

在农田上选择土壤表层含水率比较典型、且便于安装摄像头的地方作为测试点,把数字摄像头固定在支架上,通过计算机动态采集和分析作物根部土壤表层含水率,图 1 是示意图,其中摄像装置采用 420 线带红外的 CCD 摄像头,采集土壤样品的面积大小由摄像装置离土壤表层的距离来调节。土壤表层含水率的测试分为 3 个过程:土壤表层图像的在线采集,灰度特征参数的提取和土壤表层含水率的计算。

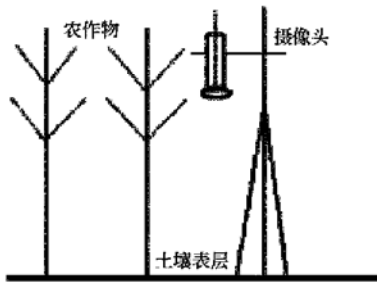


图 1 土壤表层图像在线采集示意图
Fig. 1 Sketch map of online sampling of soil surface images

2 特征参数的提取

土壤表层含水率的多少可以通过土壤表层颜色的深浅程度来表示。利用图像处理技术判断土壤表层图像灰度值的大小,其关键在于能否真实、准确地提取土壤表层的灰度特征参数。为此,土壤表层灰度特征参数的提取工作可分为中值滤波预处理、图像模式转换、“坏区”的识别与过滤和土壤灰度平均值的求取几个过程。

2.1 中值滤波预处理

图像的获取过程中,在一定程度上存在着随机扰动,使摄入的图像含有一定的噪声。为了尽可能地提高识别效果,有必要进行中值滤波预处理,即对一个滑动窗口内的 RGB 诸像素灰度排序,用相应的中值代替窗口中心像素的原来灰度,实现非线性的图像平滑处理,这对脉冲干扰及椒盐噪声的抑制效果较好,采用不同形状和大小的窗口对图像进行处理会得到不同的效果。本课题采用 5×5 十字形中值滤波器模板,该模板能有效地去除噪声且保留图像的原始信息。图 2 是土壤表层图像中值滤波预处理的效果图。

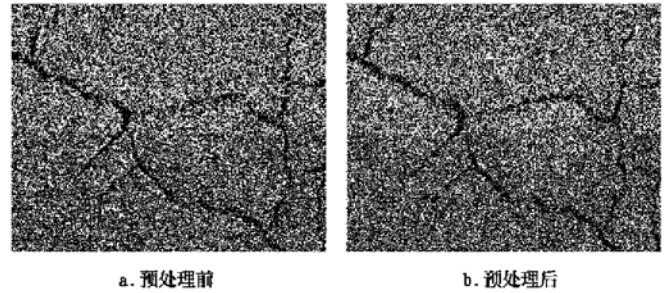


图 2 土壤表层图像中值滤波预处理
Fig. 2 Median filtering pretreatment of soil surface image

2.2 图像模式转换

若直接在 RGB 模式的彩色图像中提取土壤表层的特征,其图像的色彩灰度受照明的影响很大,同时因照明的光强度变化而影响测量的精度,在自然环境下没有特殊的光源装置,为此,先把采集到的 RGB 模式的彩色图像转化为 $L^* a^* b^*$ 图像模式,然后再提取土壤表层颜色特征参数。

$L^* a^* b^*$ 模式是基于人眼视觉原理建立起来的坐标系,其中 L 表示一个通道的亮度, a^* 表示从深绿色(低亮度值)到红色(中亮度值)色调, b^* 表示从亮蓝色(低亮度值)到黄色(高亮度值)色调,由于 $L^* a^* b^*$ 模式描述彩色的范围广,亮度与表示颜色的两个通道分开,有利于图像分析^[12]。RGB 模式图像中 R, G, B 的灰度值和 $L^* a^* b^*$ 模式图像中 L 的灰度值是受照明强度影响,而 $L^* a^* b^*$ 模式图像的 a^*, b^* 灰度值在一定照明强度范围内基本上是不受照明强度的影响。

首先将 RGB 模式图像中 R, G, B 的灰度值转换为 XYZ 模式中的色度值 X, Y, Z ,然后再将色度值 X, Y, Z 转换为 $L^* a^* b^*$ 色彩模式下的 L, a^*, b^* ,即:

$$\begin{cases} X = 0.607R + 0.174G + 0.201B \\ Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ Z = 0.066G + 1.117B \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ a^* = 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \\ b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \end{cases} \quad (3)$$

在标准白色光的情况下,上式中 $X_0 = 0.983, Y_0 = 1.000, Z_0 = 1.183^{[13]}$ 。

2.3 “坏区”的识别与过滤

所谓“坏区”是指图像上被严重干扰的区域,如土壤表面出现的裂纹、树枝秸秆等,这些“坏区”不能反映土壤表层图像灰度的真实情况。因此,必须先识别这些“坏区”,并将“坏区”从图像中过滤掉,以提高检测精度。

1) “坏区”的识别

设正常无干扰的土壤表层图像灰度分布区间为 $[a, b]$, 则灰度值不属于该区间的图像称之为“坏区”。坏区”识别的关键就是确定阈值 a 和 b 。由于土壤图像的灰度值随含水率的多少而变化, 使用固定阈值显然是不合理的。运用恒虚警检测技术^[14], 根据土壤表层图像灰度值的实际情况确定阈值, 采用这种浮动阈值的方法可自适应地确定一个与土壤图像灰度值相对应的阈值, 这个阈值随土壤含水率的不同而变化。

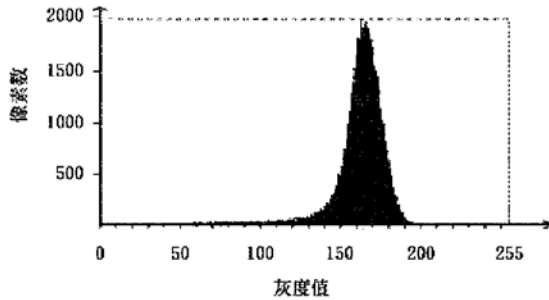


图 3 土壤表层图像灰度的直方图

Fig. 3 Gray histogram of soil surface image

由图 3 可知, 土壤表层图像灰度的直方图属正态分布, 设图像的灰度平均值为 μ , 图像的方差为 δ , 则相应的概率密度分布为:

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\delta^2}} \quad (4)$$

确定一个阈值 a , 使所有灰度值高于 a 的像素点都作为背景来考虑, 而灰度值在 a 以下的所有像素点都考虑为裂纹点, 则把背景上的点错分类为裂纹点的概率, 即虚警概率^[7] 为

$$P_f = \int_{-\infty}^t p(t) dt = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\delta^2}} dt \quad (5)$$

为得到归一化的概率密度分布, 可取新的变量

$$k = \frac{\mu - \alpha}{\delta} \quad (k > 0) \quad (6)$$

可得新变量 k 的概率密度分布为

$$p(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{k^2}{2}} \quad (7)$$

则虚警概率为

$$P_f = \int_{-\infty}^K p(k) dk = \int_{-\infty}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{k^2}{2}} dk \quad (8)$$

当 P_f 为常数时, 则虚警恒定, 即

$$k = \frac{\mu - a}{\delta} \quad (9)$$

$$a = \mu - k\delta \quad (10)$$

其中 K 取 3~ 4 之间的值对“坏区”的识别比较合理。同理可求得

$$b = \mu + k\delta \quad (11)$$

2) “坏区”的过滤

“坏区”过滤的任务就是把土壤图像上受到严重干扰的区域剔除掉。在“坏区”识别过程中已经确定了正常无干扰的土壤表层图像灰度分布区间为 $[a, b]$, 现在只需建立一个合适的映射, 对原图像进行灰度值变换即可。令 $f(x, y)$ 表示原图像在 x, y 位置的灰度值, $g(x, y)$ 表示变换后图像在相应位置的灰度值, 则有

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & a \leq f(x, y) \leq b \\ 0 & f(x, y) < a \text{ 或 } f(x, y) > b \end{cases} \quad (12)$$

2.4 土壤灰度平均值

通过中值滤波、色彩模式转换及干扰区域的过滤, 得到土壤的灰度图像 $g(x, y)$, 然后由下式可计算出土壤图像灰度的平均值 G 。

$$G = \frac{\sum_{b > g(i,j) > a} g(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{b > g(i,j) > a} N(i,i)} \quad (13)$$

式中 $g(i, j)$ —— 图像 (i, j) 点的灰度值; $N(i, j)$ —— (i, j) 点的权重系数。

3 试验与结果分析

3.1 试验方法

为了验证上述图像处理方法的有效性, 及本文所述方法的适应性, 分别对 3 种情况进行了试验。第一种情况是针对同一母质的各种含水率的土壤表层图像数据, 采用上述不同的图像处理方法进行统计分析; 第二种情况是对不同母质的各种含水率的土壤表层图像数据, 采用最有效的图像处理方法进行统计分析; 第三种情况是对不同厚度的同一母质的各种含水率的土壤表层图像数据, 采用最有效的图像处理方法进行统计分析。

1) 土壤表层含水率的计算

利用重量烘干法获得土壤的含水率, 即先取 g_1 的干燥土壤, 加入 g_2 的自来水使土壤的含水率达到 40% 左右, 然后放在室外自然烘干, 在自然烘干过程中定时对土壤表层图像进行采集, 同时称取土壤水分的蒸发量 g_3 , 则土壤的含水率 $w(\%)$ 可由下式计算得到。

$$w = \frac{g_2 - g_3}{g_1} \times 100\% \quad (14)$$

随着时间的推移, 土壤中的含水率越来越少, 记录并计算出不同时刻土壤中的含水率, 同时获取不同时刻土壤表层的图像。对进行试验的 3 种情况均采用该方法获取土壤表层的含水率及其相对应的土壤表层图像。

2) 不同母质土壤的选择

试验的土壤采用较为典型的 3 种土: 黏土、沙壤土和沙土。沙壤土和沙土的含沙量分别为 30.77% 和

53.85%。选择这3种母质的土壤来观察本文所述土壤表层含水率检测方法对不同母质土壤的适应性。

3) 不同厚度土壤的选择

试验土壤的厚度分别选为5 cm, 10 cm, 15 cm, 由于采用土壤表层图像处理的方法来判断含水率的多少, 所以土壤的厚度不能取得太大。

3.2 试验结果分析

3.2.1 土壤表层图像处理的有效性

以黏土为例, 对同一母质的土壤, 进行各种含水率的试验, 图4是含水率与灰度平均值之间的关系曲线, 其中曲线1为没有经过任何图像处理的结果, 曲线2是经过中值滤波和图像模式转换处理的结果, 曲线3是经过中值滤波、图像模式转换和“坏区”过滤处理的结果。显然, 未经任何图像处理的数据比较分散, 主要因受到背景光照强度和各种干扰的影响, 经过中值滤波和图像模式转换处理的数据相对集中, 已解决了背景光照强度和随机噪声的干扰, 但它还受到“坏区”信息的影响, 在经过全面图像处理的数据更集中, 相应的曲线更趋线性化。通过曲线1、曲线2和曲线3的比较可知, 本文提出的土壤表层图像处理方法是行之有效的。

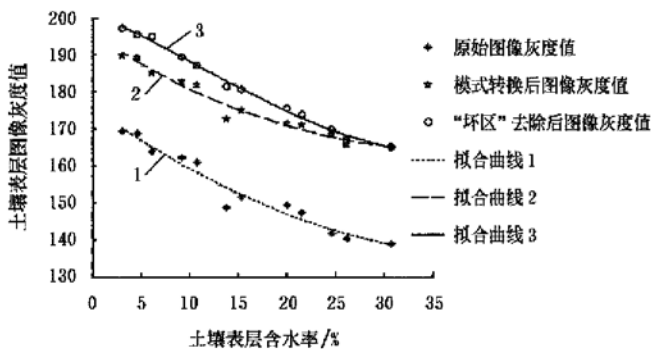


图4 土壤表层图像处理效果

Fig. 4 Processing results of soil surface image

3.2.2 土壤母质对测试的影响

对3种不同母质的土壤进行各种含水率的试验, 并对试验数据进行线性回归分析。由图5可以看出, 不同母质土壤的含水率与其灰度值之间都有着近似线性的关系。但其线性系数随着土壤母质的不同会发生变化。

3.2.2 土壤厚度对测试的影响

对3种不同厚度的同一母质土壤进行各种含水率的试验, 并对试验数据进行线性回归分析。由图6可以看出, 不同厚度土壤的含水率与其灰度值之间同样有着近似线性的关系。但其线性系数也随着土壤厚度的不同而变化。在试验中发现, 土壤表层厚度在0~10 cm的情况下, 由于土壤厚度的不同会出现土壤因干旱导致裂纹的粗细不同, 但经“坏区”过滤图像处理, 其影响很小。

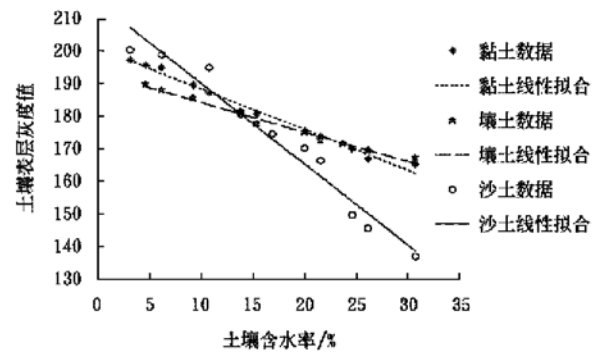


图5 不同母质土壤实验数据的线性分析

Fig. 5 Linear analysis of experimental data for different parent metal soils

当土壤厚度大于10 cm时, 由于深处土壤水分不易蒸发, 其线性关系不够理想。

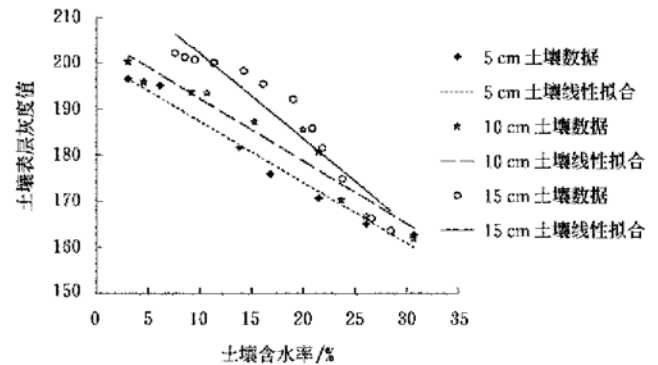


图6 不同厚度土壤试验数据的线性分析

Fig. 6 Linear analysis of experimental data for different depths of soil

4 实用性及测试误差分析

上述试验是在实验室采用称重烘干法验证了图像处理的有效性, 及土壤表层含水率检测方法的适应性, 为了进一步验证该方法在田间实际使用的可行性, 采用一款高精度、高灵敏度的测量土壤含水率的TDR-3传感器对本方法进行田间实际使用条件下的对比试验, 并进行相应的测试误差分析。TDR-3传感器在0~50% (m^3/m^3) 范围内精度为 $\pm 2\%$ (m^3/m^3), 是一种插入土壤表层直接与土壤接触的传感器。选择10个具有不同土壤湿度的被测对象, 用传感器TDR-3测取含水率, 然后用基于图像处理的测试方法(简称图像测试法)对每个被测对象进行测试, 并计算相对测量误差, 测试结果如表1所示。土壤图像的灰度值随着其含水率的升高呈现线性化减小, 相对TDR-3传感器的测试误差在5%以内, 由表1可知, 土壤含水率较小时测试误差较大。这是因为当土壤含水率较小时, 其土壤图像的灰度

值与土壤含水率之间存在非线性化趋势。

表 1 测试结果分析

Table 1 Analysis of test results

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TDP-3 测试值	12.75%	14.69%	18.56%	21.14%	22.73%	23.31%	24.68%	26.76%	29.08%	32.24%
图像灰度值	163.52	159.76	153.83	148.73	145.93	145.82	144.36	140.59	137.10	133.86
图像法测试值	12.20%	14.62%	18.43%	21.71%	23.51%	23.58%	24.52%	26.94%	29.18%	31.26%
相对误差	4.31%	0.48%	0.70%	2.70%	3.43%	1.16%	0.65%	0.67%	0.34%	3.04%

5 结 语

基于图像处理技术的土壤表层含水率的检测方法, 理论分析和不同质地不同厚度土壤的试验结果表明, 土壤表层含水率与其灰度值之间有着近似线性的关系, 但其线性系数随着土壤母质与厚度的不同而变化。但由试验的曲线可见, 当土壤的含沙量较少时, 其线性系数变化很小; 当土壤的厚度在 10 cm 以内时, 其线性系数变化也不大。然而, 在田间实际使用时, 土壤的母质是一定的, 人们所关心的是土壤表层的含水率, 只需对具体的土壤进行在线标定, 该方法在实际应用中是可行的。经田间实际使用的可行性验证, 土壤含水率测试结果的相对误差在 5% 以内, 能满足土壤含水率测试的基本要求。该方法是一种非接触式土壤含水率测试技术, 具有操作简便、实时性好、不破坏土壤环境等优点。

[参 考 文 献]

- [1] 金龙, 罗莹, 等. 农田土壤湿度的人工神经网络预报模型研究[J]. 土壤学报, 1998, 2: 25- 32.
- [2] 刘伟东, Frédéric Baret, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究[J]. 土壤学报, 2004, 9: 700- 706.
- [3] 时新玲, 王国栋. 土壤含水率测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2003, 10: 84- 86.
- [4] 李凯, 毛罕平. 微灌精确控制模式研究[J]. 水科学进展,

2003, 11: 749- 753.

- [5] 牟献友, 冀鸿兰. 农业水量管理中土壤含水率的监测技术[J]. 内蒙古农业大学学报, 2003, 12: 125- 129.
- [6] 张学利, 胡振琪, 初士立. 土壤含水率测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 2: 118- 122.
- [7] Illmer P, Schinner F. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soils[J]. Soil Biol Biochem, 1992, 24: 389- 395.
- [8] Calbo A G. A rapid method for measuring soil water content in the field with a areometer [J]. Scientia Agricola, 2002, 4: 811- 814.
- [9] Asea PEA, Kuceyrmn, Stewartjwb. Inorganic phosphate solubilization by two Penicillium species in solution culture and soil[J]. Soil Biol Biochem, 1988, 20: 459- 464.
- [10] 邓孺孺, 田国良, 柳钦火, 等. 粗糙地表土壤含水率遥感模型研究[J]. 遥感学报, 2004, 1: 75- 80.
- [11] 邓孺孺, 陈晓翔, 何执兼. GIS 支持下的深层土壤含水率遥感调查方法[J]. 中山大学学报, 1997, 5: 102- 105.
- [12] 王琴, 王卫星, 等. 基于模糊 C 均值的桉树茎切片图像纤维细胞区域提取技术[J]. 华南农业大学学报, 2005, 7: 122- 124.
- [13] 刘武恢, 胡更圣, 王琪. 印刷色彩学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [14] 段凤增. 信号检测理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.

Methods for on-line measurement of soil moisture content based on image processing technique

Zhang Rongbiao, He Jiaxiang, Wu Tao, Feng Youbing

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Soil moisture content is an important factor of influencing crop's growth. It is very important that the moisture content is measured online in water-saving irrigation control system especially. By application of computer digital image processing technique, a method for measuring soil moisture content online is put forward. After median filtering, image mode transforming, and "bad area" filtrating to images of soil layer, the authors extract the characteristic parameter of a image, that is gray-value, and carry out experiments on the relationship between the gray-value of soil layer image and the soil moisture content. The theoretical analysis and the experimental results show clearly that there is an approximate linear function relationship between the percentage of soil moisture content and gray-value of soil layer image.

Key words: soil moisture content; online measurement; invariable false alarm rate; image mode transform; median filtering