

基于 3-D 图像的植物亏水胁迫萎蔫体态辨识方法*

张慧娟¹ 赵燕东² 孙宇瑞¹ 王聪颖¹ 蔡 祥¹ Schulze Lammers P³

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083;
3. 波恩大学农业工程系, 波恩 53115, 德国)

【摘要】 萎蔫现象是植物亏水胁迫环境下表现出的一种生命特征。为了定量辨识植株的萎蔫体态,在应用激光扫描装置快速获取植株 3-D 图像基础上,定义了 4 种萎蔫指数,即叶面卷曲统计指数、叶片形心的高斯曲率、基于形心切平面的叶尖投影以及叶片边缘投影求和平均。实验方法将叶片萎蔫程度分为 5 个等级水平 (LS₁ ~ LS₅),通过逐一检验每种定义的萎蔫指数是否具有单调性得出可应用性结论。实验结果表明距离投影算法满足萎蔫指数的单调要求,尤其是叶片边缘投影求和平均萎蔫指数具有更好的鲁棒性。

关键词: 亏水胁迫 萎蔫指数 三维图像 形态辨识

中图分类号: TP391; Q945. 78 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0154-05

Identification of Plant Morphology Wilt-induced by Water Stress with 3-D Based Image

Zhang Huijuan¹ Zhao Yandong² Sun Yurui¹ Wang Congying¹ Cai Xiang¹ Schulze Lammers P³

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. Department of Agricultural Engineering, University of Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract

To identify the wilted plant morphology, based on the 3-D images obtained from a laser-scanner, four types of wilt-index were defined, including statistical index of wilt-induced leaf (SIWL), Gaussian curvature at the physical center of leave, projecting distance from leaf-tip or leaf-edge to a referenced plane being tangent at the physical center of leaf. For the experimental methodology, the wilted-leaf statuses were divided into five levels, which were used for verifying whether each defined index had monotone property from earlier to serious degree of wilt status. The experimental results demonstrated that the indices in terms of the projecting distance method could meet the requirement for this purpose. In particular, the index relating the leaf-edge to the referenced plane could provide more robust results.

Key words Water stress, Wilt-index, 3-D image, Morphological identification

引言

亏水胁迫通常指土壤水分不能满足植物的生理需求,从而使其正常的生命活动受到抑制,甚至导致植物枯死的后果,其危害程度在所有的非生物胁迫

中占首位,仅次于病虫害造成的损失^[1]。由于植物体内水势下降,植株叶片会发生不同程度的萎蔫下垂或卷曲,造成受光面积和气孔开度的减小,光合潜能与叶面蒸腾强度随之减小。从植物本身自我保护的角度看,它是基于根系汲取水分不足而采取的一

收稿日期: 2010-03-16 修回日期: 2010-06-01
* 国家自然科学基金资助项目 (30871454、30671715)、中德科学中心资助的中德联合研究小组项目 (GZ494) 和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目 (15059201)
作者简介: 张慧娟, 博士生, 主要从事信号处理与信息挖掘研究, E-mail: shuiyincy123@163.com
通讯作者: 赵燕东, 副教授, 主要从事智能检测与控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

种适应性避旱机制^[2~6]。除了受到植物根系附近土壤水分动态的影响,它的体态萎蔫程度还与所生长的温度与日照变化密切相关。由此可知,植物体态萎蔫反应程度是茎和叶片内部水势状况与复杂生长环境综合平衡调节的外部表现形式,其本身可视为一种有潜在应用价值的“活立植物传感器”。因此,依据农田土壤水分、温度、光照动态与植物对生长环境胁迫做出的早期萎蔫反应实时决策最优灌溉,对提高农业生产水资源的高效利用具有重要现实意义。作为一种前期探索性研究,不同亏水胁迫条件下植物萎蔫程度的快速测量技术与辨识方法则是两个关键问题。

作为植物的早期萎蔫表现特征形态之一,叶片舒展性与卷曲程度尤其值得研究。为了定量分析叶片的卷曲程度,传统方法是在定义叶片卷曲度(不同卷曲情况下叶片长、宽比与完全舒展叶片的长、宽比的相对百分比变化)基础上借助于手工测量实现的^[2~3]。该方法不仅对样本造成物理性扰动,有可能导致叶片接触性硬伤甚至完全脱落,而且无法获得叶片的真实 3-D 图像与早期萎蔫特征。为了应用机器视觉方法辨识植物亏水胁迫的反应形态,文献[7~9]曾先后试图从 2-D 图像处理技术中挖掘出所需要的关键信息。尽管借助于数码相机可以方便地得到植物体态的 2-D 图像,但从数学意义上看,它属于一种函数空间的压缩映射,难以满足估计植物实际的 3-D 体态特征的完备条件。总的看来,应用先进图像传感技术与相应的信息处理方法实现植物叶片形态的 3-D 测量与萎蔫形态特征刻画,这类探索研究鲜有报导。

本文首先提出借助于激光斜射测距原理的 3-D 扫描装置快速获取植株叶面形态的原始信息,在此基础上从不同的直观分析角度定义几种描述叶片萎蔫形态的量化指数,根据不同萎蔫程度的叶片形态实验测量数据,对这些所定义的叶片萎蔫指数进行比较研究与客观评价。

1 3-D 形体测量装置与样本分类

1.1 激光扫描测量装置

基于激光斜射测距原理的 3-D 扫描装置如图 1 所示。它除了测量结果可支持 3-D 数据分析之外,这种非接触式测量方法还具有扫描过程中不影响物体形态,不损伤测量表面、分辨力高与测量准确、快速等诸多优点。在农业领域已被应用于耕作农田土壤表面粗糙度测量与活立植物生物物质容积质量测量^[10~12]。

本研究所使用的激光扫描仪系统由德国波恩大

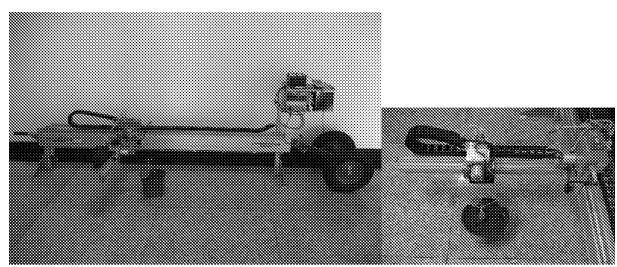


图 1 激光扫描装置与实验应用

Fig. 1 Laser scanner used for the test

学农业工程研究所和中国农业大学精细农业中心合作研制,它依靠两节铅酸电池(12 V,7 000 mA·h)串联供电,整个测量系统包括激光斜射测距传感器,行进位移传感器, x 轴、 y 轴直流驱动电动机,2-D 轨道,下位机控制器与上位机平台。下位机控制器核心芯片为 MSP430,它承担激光传感器测距原始数据的实时采集与计算,2 只直流电动机按照控制指令沿 x 轴与 y 轴分时步进移位。上位机是在一个商品化 PDA 系统配置基础上开发实现的,它根据具体任务对象的要求接收操作者的扫描参数设定,测量过程中 3-D 扫描数据的动态显示、数据存储以及向其他 PC 计算机的数据转移。上位机与下位机间的数据交换通过标准串口 RS-232 完成。激光扫描传感器沿 x 轴与 y 轴方向的最大可控移动范围分别为 0~1.75 m 和 0~0.8 m,最小移动扫描步距为 1 mm,测距分辨率 1 mm。显然,在设定的扫描 2-D 平面区域内逐点测量,即可获得扫描范围内的叶片表面各点到导轨基准面的垂直距离,这些距离数据的全体集构成所测量的 3-D 原始数据。进一步将这些原始数据按照其平面位置排列构成一个数据矩阵,通过该矩阵则很容易重构出扫描叶片表面凹凸的真实状态。关于这台仪器测量原理与技术性能细节的详细描述,可见文献[10]。

1.2 植株叶片样本

作为一种初步探索,本文涉及的研究侧重点是分析基于不同数学方法所定义的萎蔫指数与可应用性,而不是研究土壤水分、环境温度与光照强度与每一种所定义的萎蔫指数的相关性。因为只有首先确定了所定义的萎蔫指数是否随叶片萎蔫程度的变化呈现某种单调关系,才可能进一步分析该萎蔫指数与外部生长条件的相关性。为此,通过人为控制植株生长的土壤水分、环境温度与日照光强等参数,模拟获得了 5 个萎蔫程度水平($LS_1 \sim LS_5$)的西葫芦(*Cucurbita Pepo* L.)叶片形态,其中 LS_1 表示叶片完全舒展, LS_2 表示叶片出现早期轻度萎蔫症状, LS_3 表示中度萎蔫症状, LS_4 表示较严重萎蔫症状, LS_5 表示严重萎蔫症状。选取西葫芦作为植株样本的原因有

两点:①它喜湿润,不耐旱,对土壤水分、光照与生长温度等参数的变化影响均非常敏感。②它的主茎很短,贴近地面向上生长,在整个生长期其株高发展非常有限(0.2~0.3 m),不属于蔓藤类植物四处扩张。可以保证实验期间它的主茎、枝干与叶片位置都相对固定,应该说是一种比较理想的“活立植物传感器”。因此只要预先确定激光扫描装置与样本的相对位置,实验过程中通常不再需要根据植株长势调整传感器的角度与高度。

2 叶片萎蔫指数理论分析

为了规范下面的讨论,设想 3-D 坐标中的 z 轴与植株主茎相平行, $x-y$ 平面与植株伫立的地面相平行,由此引出以下各种萎蔫指数的定义。

2.1 叶面卷曲统计指数

将不同凹凸程度叶片卷曲样本视为一类具有某种随机分布特征的空间高度数据集合,定义以标准方差作为描述叶面形态的萎蔫指数 $SIWL$ (statistical index of wilt-induced leaf)

$$\begin{cases} SIWL = \sqrt{\frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{i,j} - \bar{z})^2} \\ \bar{z} = \frac{1}{mn-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{i,j} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $m、n$ —— x 轴、 y 轴方向上的步进测量点数
 $z_{i,j}$ ——叶面任意采样点(x_i, y_j)的地面相对高度

2.2 叶片形心的高斯曲率

定性分析可知,当叶片完全舒展时,叶面各点的高斯曲率将趋于无穷大。反之当叶片出现萎蔫卷曲,各采样点曲率必定随之改变。为此考虑将叶片形心作为采样点,通过实验研究考察该点的高斯曲率是否随萎蔫程度的变化呈现单调递减关系。

由曲面形心计算知

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\iint_{\Omega} x\rho(x,y) \, dx dy}{\iint_{\Omega} \rho(x,y) \, dx dy} \\ y_0 = \frac{\iint_{\Omega} y\rho(x,y) \, dx dy}{\iint_{\Omega} \rho(x,y) \, dx dy} \\ z_0 = f(x_0, y_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\rho(x, y)$ 为叶面采样网格的表面积。因此基于叶片形心 $M(x_0, y_0, z_0)$ 的高斯曲率为

$$K = \frac{\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)^2 \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right)^2 - \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2}{\left(1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right)^2} \Bigg|_{(x_0, y_0, z_0)} \quad (3)$$

2.3 叶片面积的方向投影

考虑到亏水胁迫下萎蔫叶片的物理形态既有叶片卷曲,同时伴有叶柄下垂。此外,植株在室外观测过程中可能会因周围气流变化而出现摇摆,对测量结果产生扰动。为此在此将参考原点选为叶片形心,通过叶片形心的切平面作为投影参考平面,将叶尖或叶片边缘到参考平面的投影距离作为观测萎蔫指数。由数学分析知空间曲面上任意点(x_0, y_0, z_0)的切平面公式为

$$\begin{aligned} z - z_0 &= (x - x_0) \frac{\partial z}{\partial x} \Bigg|_{(x_0, y_0, z_0)} + \\ &\quad (y - y_0) \frac{\partial z}{\partial y} \Bigg|_{(x_0, y_0, z_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)按空间平面标准表达式进行转换,得到

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (5)$$

此时叶片上任意点(x_i, y_i, z_i)到该平面的投影距离为

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (6)$$

一般来说叶片形心不会落在叶片边缘上,即(x_i, y_i, z_i) $\neq$ (x_0, y_0, z_0),因此恒有 $d_i > 0$ 。若沿着叶片轮廓边缘步进扫描获取的原始测量数据点数为 m ,求和并取平均即有

$$\bar{d}_{\Sigma} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_i \quad (7)$$

此外,还根据叶片样本的实际几何形状,选取叶片的叶尖作为一个特殊观测点,尝试将它到切平面的投影距离也作为一种萎蔫指数(d_{tip}),按照式(6)给出了计算结果与分析。

3 结果及讨论

3.1 植物叶片原始萎蔫形态测量

图 2 是在对扫描获取的 5 种模拟萎蔫状态叶片的原始数据基础上,进行了叶片分割,高频噪声滤波,简化高度矩阵等必要的预处理后重构的三维图像。由此可以清晰、直观地看出 $LS_1 \sim LS_5$ 所对应的 5 种萎蔫水平差异。其中 LS_1 叶片样本图像完全舒展,近似于一个空间平面,而 $LS_2 \sim LS_5$ 样本图像中的叶片有不同程度的局部褶皱与叶脉弯曲下垂,它们代表了一簇空间曲面。这些结果表明应用自行研制的激光扫描装置可以获得理想的 3-D 原始数据图像,通过这些原始数据可对所定义的各种叶片萎蔫指数作出客观评价。

3.2 不同叶片萎蔫指数比较

表 1 给出了相对于 $LS_1 \sim LS_5$ 5 种萎蔫程度水平

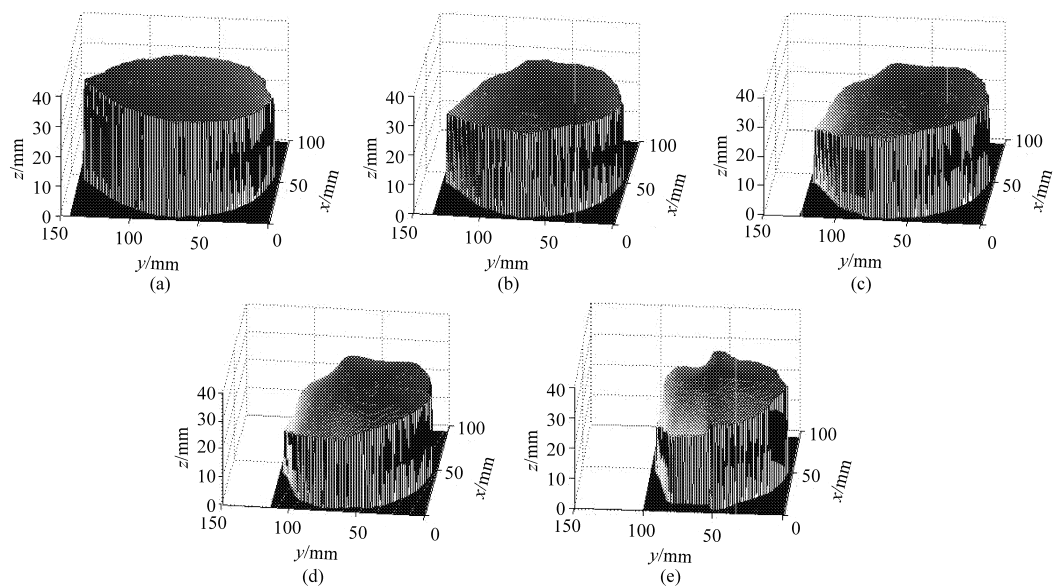


图 2 5 种萎蔫状态下叶片三维扫描图

Fig.2 Cluster of scanned 3-D curves referring to different wilted states of leaf

(a) LS_1 (b) LS_2 (c) LS_3 (d) LS_4 (e) LS_5

下结合以上所定义的各萎蔫指数得到的计算数值。作为表 1 中实验与计算结果的图形化表达,图 3 和图 4 分别给出了所定义的 4 种萎蔫指数对应不同萎蔫阶段的变化趋势。

表 1 定义的萎蔫指数对应不同萎蔫程度的实验数据
Tab.1 Experimental results of the defined wilt-indices with respect to the different wilted statues

萎蔫状态	$SIWL/mm$	$K/\%$	d_{tip}/mm	$\bar{d}_\Sigma/mm$
LS_1	1.5377	1.84×10^{-3}	1.507 6	1.169 1
LS_2	1.333 8	1.38×10^{-3}	4.098 9	2.467 4
LS_3	2.025 3	1.54×10^{-4}	9.301 7	3.363 0
LS_4	2.437 3	-9.63×10^{-6}	12.801 0	4.173 1
LS_5	2.746 2	1.61×10^{-3}	16.558 0	6.251 5

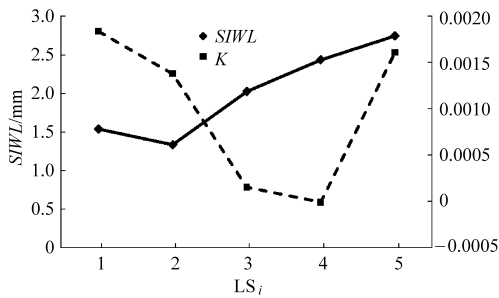


图 3 $SIWL$ 与高斯曲率 K 随不同萎蔫水平的变化趋势
Fig.3 $SIWL$ and K varied as the different levels of leaf wilt statues, respectively

比较表 1 中各萎蔫指数对应的实验结果可以看出:

(1) $SIWL$ 在 LS_2 水平附近出现一个极小值,它使得该萎蔫指数并非随叶片萎蔫状态的逐渐加重而单调递增,其原因可能是当叶片呈完全舒展状态时

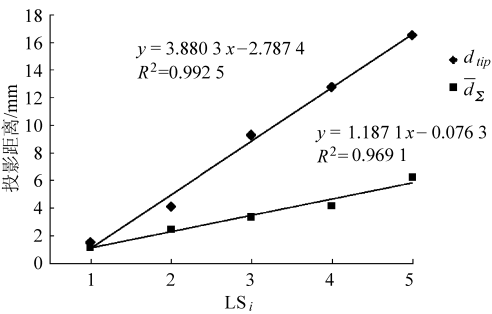


图 4 d_{tip} 与 $\bar{d}_\Sigma$ 随不同萎蔫程度的变化趋势
Fig.4 d_{tip} and $\bar{d}_\Sigma$ varied as the different levels of leaf wilt statues, respectively

(LS_1),它并非是一个理想的空间平面,而是边缘略有上翘(或叶片内部略微下凹)的空间曲面。因此,在植株萎蔫状态出现初期(LS_2),随着叶片开始略微下垂,它反而起到了抵消局部凸起的作用。由此看来,叶片在 LS_2 阶段反而近似呈理想的空间平面特征。随后伴随亏水萎蔫状态的加重,叶片边缘下垂逐渐明显(即叶片形心区域明显凸起), $SIWL$ 数值在 $LS_3 \sim LS_5$ 阶段的变化呈现单调上升趋势。

(2)高斯曲率 K 的变化不仅没有达到理想的期望值,而且在 LS_4 阶段还出现了变号。从数学意义上讲, $K > 0$ 意味着曲面在该点是凸起的,反之下凹。可以想象,一旦植株根系供水不能满足叶片蒸腾与生长的需求,细胞壁则出现松弛,而叶片出现萎蔫形变则是叶脉支撑力下降的表现。当各叶脉支撑力下降不一致时,叶片将出现局部褶皱。所以由此实验结果可以引伸出两点否定性结论:①将形心作为检验叶片高斯曲率的采样点未必合适。②用点估计刻画整体叶片形状的改变未必合理。

(3)与两种定义的萎蔫指数不同,表 1 与图 4 的实验结果表明基于距离投影的萎蔫指数无论是对边缘投影积分 $\bar{d}_2$ 还是叶尖投影 d_{tip} 都随着亏水胁迫的增加呈现出线性递增趋势,且两者与 $LS_1 \sim LS_5$ 的相关性均满足 $R^2 > 0.95$ 。这一事实表明当植株细胞壁因亏水胁迫出现松弛首先会表露在叶脉末梢,这是因为叶脉末梢最细,离植株主茎路径最远。植株生长过程一旦出现供水不足,早期萎蔫症状最先通过叶片边缘的下垂形态变化表现出来。将两者的变化数值比较,叶尖的变化更为敏感。尽管叶尖的距离投影可以作为一个单调的萎蔫指数,但它毕竟是一种点估计,鲁棒性还需要在未来的实验研究中进一步检验。反之,叶片边缘投影基于求和平均算法,它包括了平滑滤波的效果,鲁棒性似乎更为理想。

4 结 束 语

初步研究结果表明,借助于三角斜射激光扫描装置可以快速获取植株 3-D 叶片图像,并依此定量分析植物在亏水胁迫下的形态响应。由所定义的 4 种萎蔫指数结合实验结果比较分析,发现基于叶尖距离投影萎蔫指数 (d_{tip}) 与叶片边缘距离投影的求和平均算法所获得的萎蔫指数 ($\bar{d}_2$) 均可以较好地反映出植株萎蔫程度的 5 种状态。尤其值得重视的是由于叶片边缘处于叶脉末梢,该指数可用于植株早期亏水胁迫的状态检测,显然具有更高的实用价值。此外,该方法创新点之一是将观测叶片形心的切平面作为距离投影参考面,鉴于距离投影是在相对坐标之间实现的,它可有效地减小 3-D 图像扫描过程中因气流变化引起的叶片轻度摇摆导致的测量误差。

参 考 文 献

1 段建丽. 干旱胁迫对桑树生理的影响[D]. 镇江:江苏科技大学,2007.

2 金千瑜, 欧阳由男, 禹盛苗, 等. 土壤干旱胁迫对不同水稻品种叶片卷曲的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(4): 349 ~ 354.

Jin Qianyu, Ouyang Younan, Yu Shengmiao, et al. Influence of soil drought stress on leaf rolling index in different rice varieties[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(4): 349 ~ 354. (in Chinese)

3 Turner N C, O'Toole J C, Cruz R T, et al. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits I. Stress development, canopy temperature, leaf rolling and growth[J]. Field Crops Res., 1986, 13: 257 ~ 271.

4 Turner N C, O'Toole J C, Cruz R T, et al. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits II. Osmotic adjustment, leaf elasticity, leaf extension, leaf death, stomatal conductance and photosynthesis [J]. Field Crops Res., 1986, 13: 273 ~ 286.

5 Jongdee B, Fukai S, Cooper M. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice[J]. Field Crops Res., 2002, 76(2 ~ 3): 153 ~ 163.

6 Lilley J M, Ludlow M M. Expression of osmotic adjustment and dehydration in diverse rice lines[J]. Field Crops Res., 1996, 48(2 ~ 3): 185 ~ 197.

7 Revollon P, Chassériaux G, Rivière L M, et al. The use of image processing for tracking the morphological modification of forsythia following an interruption of watering[C] // Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering, Oslo, Norway, 1998:872 ~ 873.

8 Carter G A, Miller R L. Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress sensitive wavebands[J]. Remote Sens. Environ., 1994, 50(3): 295 ~ 302.

9 Foucherl P, Revollonl P, Vigouroux B, et al. Morphological image analysis for the detection of water stress in potted forsythia [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 131 ~ 138.

10 蔡祥, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 基于激光反射的土壤粗糙度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 68 ~ 71, 91.

Cai Xiang, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 68 ~ 71, 91. (in Chinese)

11 Sun Y, Schulze Lammers P, Damerow L, et al. Predicting surface porosity using a fine-scale index of roughness in a cultivated field[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(1): 57 ~ 64.

12 Ehlert D, Horn H, Adamek R. Measuring crop biomass density by laser triangulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 117 ~ 125.