

基于 TOF 摄像机的植物叶态萎蔫辨识研究

张新<sup>1</sup> 高超<sup>1</sup> Martin Kraft<sup>2</sup> 赵燕东<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 德国联邦农业、林业和渔业研究所农业技术分所, 布伦瑞克 38116)

**摘要:** 为定量辨识植物叶态的萎蔫程度, 定义了基于离散时域傅里叶变换的萎蔫指数, 搭建了一套植物叶态采集系统, 以黄瓜和绿皮西葫芦幼苗为试验样品, 采用植株根部快速失水与汲水的方法, 控制植株叶片处于不同程度的萎蔫状况, 使用 TOF 摄像机获取叶态 3D 图像信息, 对图像进行去噪、阈值分割、点积运算等处理, 得到目标叶片的三维点云数据, 运用离散时域傅里叶变换计算其萎蔫指数。通过对黄瓜单片叶和绿皮西葫芦多片叶在植物失水、叶片萎蔫阶段和植物吸水、叶片恢复阶段的萎蔫指数定量对比分析, 以及对叶片萎蔫指数在整个植物水分胁迫过程的单因素方差分析, 显著性分别为 0.890 4、0.292 2、0.903 6, 均大于 0.05, 验证了基于 TOF 摄像机的叶态萎蔫定量辨识方法的可行性与准确性。

**关键词:** 植物; 叶态萎蔫; TOF 摄像机; 傅里叶变换; 机器视觉

**中图分类号:** S24; Q945.78      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0275-06

Identification of Plant Leaf Wilting Using TOF Camera

Zhang Xin<sup>1</sup> Gao Chao<sup>1</sup> Martin Kraft<sup>2</sup> Zhao Yandong<sup>1</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Thuenen Institute of Agricultural Technology, German Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries, Braunschweig 38116, Germany)

**Abstract:** Leaf wilting is a common phenomenon in plants. Wilting detection is of high importance for plant precision management. In this study, the 3D image of plant leaf was collected using a time-of-flight (TOF) camera to quantificationally identify the degree of plant leaf wilting. The 3D information of targeted leaf was examined by the custom wilting index based on discrete time Fourier transform, in which the leaf is equivalent to a mathematical surface in 3D space. Rapid dehydration and rehydration method was used to make plant leaf state different wilting degrees. The image acquisition experiment was proceeded by a acquisition system based on the seeding of cucumber and zucchini. De-noising, threshold segmentation and dot product were used in image preprocessing after the images were collected, and then the wilting index was calculated. The experiments were divided into three periods, which means, dehydration period I, rehydration period and dehydration period II, and the trend of wilting index was favorable at each stage. The universality was simulated through the variance analysis of a piece of leaf and different pieces of leaf from the same plant. The significance levels are respectively 0.890 4, 0.292 2 and 0.903 6, which are all larger than 0.05. In general, the feasibility and accuracy of the identification of leaf wilting using TOF camera are verified. As leaf wilting embody in many aspects because of different kinds of factors, control variate method was used in this paper. The identification of outdoor plant leaf wilting needs to be intensively studied.

**Key words:** plant; leaf wilting; TOF camera; Fourier transform; machine vision

收稿日期: 2015-09-20    修回日期: 2016-01-05

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31371537)和北京市教育委员会科学研究与研究生培养共建项目(BLCXY201520)

**作者简介:** 张新(1989—), 男, 博士生, 主要从事智能检测与控制研究, E-mail: qababab@126.com

**通信作者:** 赵燕东(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事生态检测与智能控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

引言

植物叶态萎蔫是植物亏水胁迫环境下表现出的一种生命特征<sup>[1]</sup>,是基于根系汲取水分不足而采取的一种适应性避旱机制<sup>[2-4]</sup>。叶态萎蔫程度的变化是植物叶片内部水势状况与复杂生产环境综合平衡调节的外部表现形式,能够直接、真实地反映植物的需水情况<sup>[5-8]</sup>。而土壤水分作为灌溉指标仅仅反映了作物水分的供应情况<sup>[9]</sup>;叶水势、叶片含水率等生理指标虽然从本质上能够反映作物缺水程度<sup>[10]</sup>,但这些生理指标测定方法对样品均具有破坏性,况且目前也缺乏对这些指标自动、连续的监测手段,与现代农业灌溉所要求的无损、自动、连续监测不符,难以用来提供适时、准确的植物需水信息<sup>[11]</sup>。

基于飞行时间法(Time-of-flight, TOF)原理的深度摄像机采用一种主动光测量的3D探测技术,通过计算光飞行的时间来确定目标与相机之间的距离<sup>[12]</sup>。该摄像机最突出的优势是可全天候地以高帧速捕获场景的深度图像,利用距离信息方便地分离前景与背景,同时提供了多种图像以供目标识别<sup>[13]</sup>。已取得的成果包括导航机器人的地图创建、检测车位空间以协助停车和人脸识别等,并且在农场动物监视、作物类别识别、植物生长测量等农林方面有初步应用<sup>[14-15]</sup>,SONG等<sup>[16]</sup>使用TOF摄像机进行了叶面积的无损测量,基于TOF摄像机的植物叶态萎蔫辨识研究在国内外尚未有相关报道。

机器视觉是用机器代替人眼来对物体进行测量与特征判断<sup>[17]</sup>。与2D机器视觉主要辨识被观测对象的颜色不同,基于3D图形的机器视觉可以从植物叶片的形态变化上做出判据,一旦植物生长过程中出现亏水胁迫,必定首先在体态上做出快速响应。本文利用TOF摄像机获取植物叶片的体态信息,通过自定义的植物叶态萎蔫指数对采集的三维图像进行检验,以期定量地辨识植物叶态萎蔫程度。

1 原理

1.1 TOF 摄像机工作原理

TOF 测量系统主要由射频调制发光管(LED)或者激光阵列、CMOS 或者 CCD 接收传感器组成,如图1所示。TOF 摄像机采用间接测距技术,其发射器向目标发出振幅经过余弦调制的光信号,经探测器接收目标反射后的入射光,获得发射光与入射光信号的相位差,由此计算出飞行时间,再结合光速,可以得到摄像机与目标的距离<sup>[18]</sup>。摄像机上每个像素都可以接收信号,因此,每个像素都能测量到相应目标的距离。由 TOF 拍出的3D 图像上的每个像

素点所代表的测量距离  $d$  就是根据光速  $c$  在  $t$  时间内的飞行距离来计算得出的,考虑到  $d$  为光飞行距离的一半,计算公式为

$$d = \frac{c}{4\pi f_m} \Delta\phi$$

(1)

式中  $c$ ——光速  
 $f_m$ ——连续调制光信号频率  
 $\Delta\phi$ ——光在飞行过程中信号产生的相位延迟

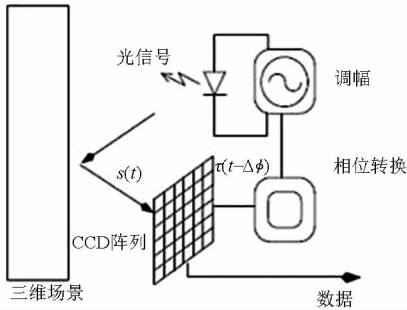


图1 TOF 摄像机组成及工作原理示意图

Fig.1 Composition and working principle of TOF camera

1.2 基于离散时域傅里叶变换的植物叶态萎蔫指数定义

叶片曲面上的点云数据为非周期性离散信号,应用2D离散时域傅里叶变换进行运算得到频谱信息,频谱中的直流分量代表了曲面的平面成分,高次谐波分量代表曲面中不同弯曲程度的曲面成分,直流分量在频谱中所占的比重可以定量地表征植物叶片的萎蔫程度。依此定义了萎蔫指数  $L$  为

$$L = \frac{A_0}{A_0 + \sum_{i=1}^n A_i}$$

(2)

式中  $A_0$ ——频域分解出的直流分量谱幅度  
 $A_i$ —— $i$  次谐波下的幅度谱

显然,按照式(2)定义的频域萎蔫指数  $0 < L < 1$ 。在叶片水分饱和的情况下,  $L$  趋于1;反之,在严重萎蔫情况下,  $L$  趋于0。同时,基于频域傅里叶分解定义的萎蔫指数  $L$ ,是基于全局几何特征参数,不需要考虑叶片局部形心位置<sup>[19]</sup>。

2 试验设计与数据分析

2.1 试验设计

采用德国PMD Technologies公司的PMD CamCube 3.0型TOF摄像机,其测量范围为0.3~7 m,可重复性小于3 mm,视场角为40°×40°,帧率有3种,本试验中选取分辨率最大的40 帧/s,分辨率为200 像素×200 像素。发射光波长为870 nm时,植物叶片各部分的发射率比可见光区的更大,可有效提高目标数据的可靠性,同时该摄像机集成了抑制背景光技术,可减少环境因素的干扰。

植物样本选用黄瓜和绿皮西葫芦的幼苗,它们的共同特征是叶片舒展、宽大,对亏水胁迫响应灵敏,叶片萎蔫形态变化明显,易于辨识<sup>[20-21]</sup>。植物幼苗在同样的生产环境中进行培养,多株黄瓜和绿皮西葫芦分别种在 2 个花盆中,每个花盆中大约有 11 L 土壤,在培育过程中,生长状态较差的叶片(破损、枯萎等)被剪除,只保留生长状态良好的叶片。

试验地点位于德国联邦农业、林业和渔业研究所农业技术分所,试验时间为 2014 年 6—8 月。3D 图像采集装置如图 2 所示,图像采集装置位于暗室中,消除了环境光影响。



图 2 植物叶态 3D 图像采集装置

Fig. 2 3D image collection device of plant leaf

植株用三角架夹持固定,TOF 摄像机安装于植株的正上方,镜头朝下,摄像机与植株之间的距离可

调,以使每次采集的图像完整。试验开始时,从花盆中把植株连根取出,除去根部的土壤等杂质;使用三角架固定植株,从俯视方向观察自然舒展的叶片,剪除与其他叶片有相互重叠的绝对位置靠下的叶片;根据叶片的萎蔫状况,每隔一定时间采集 1 次图像信息;在叶片萎蔫较严重时,使用试管给植株根部供应水分(5 mL),然后继续进行萎蔫状态的采集,直到叶片再次严重萎蔫。试验过程中,保持环境温度一定(黄瓜:28℃,绿皮西葫芦:27℃)。

本试验中,采用植株根部快速失水致使叶片萎蔫的方法,是为了保持植株所处环境的温度、湿度、大气压等能够影响叶片水分的因素基本不变,从而能够更加精确地得到叶片水分与萎蔫状态的对应关系,达到控制变量的目的。

2.2 叶片萎蔫指数的计算

信息获取:TOF 摄像机采集的叶片点云数据为一个 200 像素 × 200 像素的图像矩阵(记为  $I$ ),矩阵中每个元素的值即为深度信息,对应的图像信息如图 3a 所示,其中包含了所有叶片、茎秆、夹持装置以及少量由于摄像机本身误差所产生的噪声等。

数据预处理:由于萎蔫指数是针对某一片单独的叶片来计算的,因此需进行一系列的图像处理过程。首先,对图像使用中值滤波法进行去噪;其次,使用阈值分割法对图像进行分割,阈值的设定采用自适应阈值;再次,使用自适应二值化方法把图像转换为二值化图像;最后,对分割后的图像各个区域进

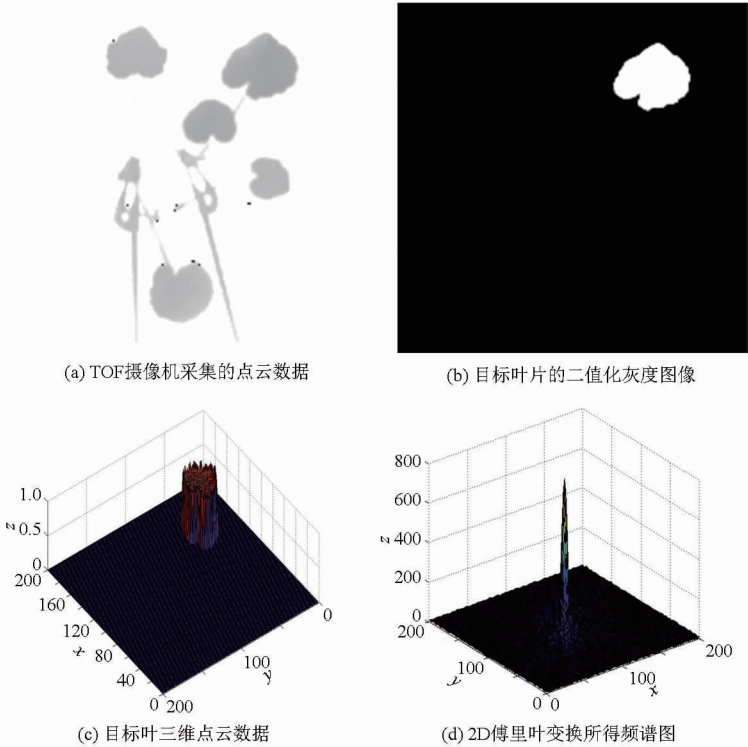


图 3 叶片 3D 信息提取

Fig. 3 Detection of 3D information in plant

行编号提取出目标叶片,得到图 3b 所示图像。本图为二值化图像,目标叶区域像素点的灰度为 1,其他像素点灰度为零,从而构成了一个 200 像素 × 200 像素的 0-1 矩阵(记为  $S$ )。

三维点云数据计算:矩阵  $S$  与矩阵  $I$  进行点积运算得到矩阵  $P$ ,那么矩阵  $P$  就是目标叶的三维点云数据集,如图 3c 所示。

萎蔫指数计算:利用 Matlab 工具对其进行 2D 傅里叶变换,得到频谱信息,如图 3d 所示,图中中心部分代表直流分量,并计算出直流分量在频谱中所占的比重,即得到叶片的萎蔫指数  $L$ 。

2.3 试验结果分析

2.3.1 单叶片萎蔫指数分析

以黄瓜的一片叶为例进行分析,结果如图 4 所示。针对此植株,按时间顺序共采集 20 个叶片状态,记状态 1 所处时刻为第 0 时刻,状态 1 到状态 9 之前为失水过程,共持续 55 min;在状态 9 发生之前 4 min 给根部供水,吸水过程持续 180 min;在状态 14 发生之后 2 min 停止供水,失水过程直到状态 20 发生后,结束图像采集,共持续 54 min;本次试验共用时 289 min。

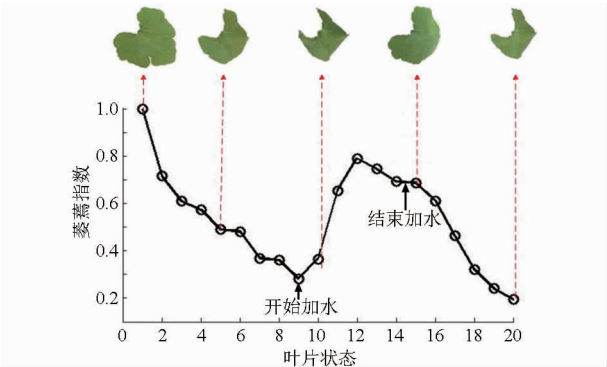


图 4 单片叶萎蔫指数(黄瓜)

Fig. 4 Wilting index of single piece of leaf (cucumber)

植株失水、叶片萎蔫过程:植株在 2 次失水过程中,随着时间的增加,萎蔫指数呈单调递减趋势,说明叶片由于水分减少,弯曲程度变大,这与之前的分析是一致的。在第 1 次失水过程中,萎蔫指数由初始的最大值 1 下降到 0.281,第 2 次失水过程中,由 0.746 下降到 0.194。在这 2 个过程中,萎蔫指数的变化幅度明显,能够精准地表示叶片的萎蔫程度。

植株吸水、叶片恢复过程:植株从根部吸收水分、通过茎脉传输到叶片、叶片恢复舒展、吸水过程时间约为失水过程时间的 3 倍,微观上表现为叶片细胞吸收水分,宏观上表现为叶片由卷曲变为舒展状态,此过程涉及到自由水的传输以及自由水和结合水之间转化的问题,因此所需时间较长。从状态 12~15 可以看出,叶片水分达到濒临饱和状态时,

萎蔫指数会在一定的范围内波动,平均萎蔫指数为 0.728。

萎蔫指数变化趋势的转折点相对于水分供应情况有一定的滞后,状态 9 发生之前 4 min 进入吸水过程,萎蔫指数依然减小;状态 15 发生之前 3 min 进入失水过程,萎蔫指数依然增大,这是由于植株的叶片水势相对于根部水势存在时滞,在此可估算其时滞约为 5 min。

由图 4 可以看出,叶片发生 2 次萎蔫过程,状态 1~9 共 9 个状态代表第 1 次萎蔫过程,状态 12~20 共 9 个状态代表第 2 次萎蔫过程。对 2 个过程的萎蔫指数进行单因素方差分析,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,组间平方和是 0.000 98,组内平方和是 0.798 75,组间平方和的  $F$  值是 0.02,显著性是 0.890 4,大于显著水平 0.05,因此可以认为 2 组萎蔫指数之间没有显著差异。表明自定义的萎蔫指数并不仅仅适用于某一特定的状态或者某一特定的过程,而是具有普遍适用性的。

表 1 萎蔫指数单因素方差分析结果  
Tab. 1 Analysis results of wilting index with one-way ANOVA

|    | 平方和      | df | 均方       | $F$  | 显著性     |
|----|----------|----|----------|------|---------|
| 组间 | 0.000 98 | 1  | 0.000 98 | 0.02 | 0.890 4 |
| 组内 | 0.798 75 | 16 | 0.049 92 |      |         |
| 总数 | 0.799 73 | 17 |          |      |         |

2.3.2 同一植株多片叶萎蔫指数对比分析

以同一株绿皮西葫芦上的 2 片叶为例进行分析。结果如图 5 所示。针对此植株,按时间顺序共采集 21 个叶片状态,记状态 1 所处时刻为第 0 时刻,状态 1~8 之前为失水过程,共持续 72 min;在状态 8 发生之前给根部供水,吸水过程持续 43 min;在状态 10 发生之后停止供水,失水过程直到状态 21 发生后,结束图像采集,持续 105 min;本次试验共用时 220 min。

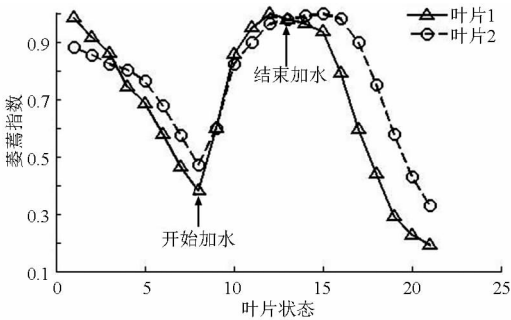


图 5 多片叶萎蔫指数(绿皮西葫芦)

Fig. 5 Wilting index of different pieces of leaf (zucchini)

分析可知:叶片 1 与叶片 2 的萎蔫指数变化趋势基本一致,从初始状态 1 开始逐渐减小,在状态 8

发生后开始增大,在状态 12 达到水分饱和,在状态 12~14 之间保持稳定,从状态 15、16 开始逐渐减小。与黄瓜叶片对水分供汲响应滞后相同,同样存在一定的时滞,不过绿皮西葫芦的时滞较小,大约为 2 min,且绿皮西葫芦达到水分饱和的时间为43 min,小于黄瓜的 180 min,说明绿皮西葫芦根部吸收水分较快,这与在育苗过程中所观测到的现象是一致的。

由图 5 可以看出,叶片发生 2 次萎蔫过程,状态 1~8 共 8 个状态代表第 1 次萎蔫过程,状态 14~21 共 8 个状态代表第 2 次萎蔫过程。对 2 个过程的萎蔫指数进行单因素方差分析,叶片 1、叶片 2 的结果分别如表 2、3 所示。从表中可以看出,叶片 1 的显著性是 0.292 2,叶片 2 的显著性是 0.903 6,均大于显著水平 0.05。与黄瓜叶片同理,可以认为 2 组萎蔫指数之间没有显著差异,表明自定义的萎蔫指数

表 2 叶片 1 萎蔫指数单因素方差分析结果

Tab.2 Analysis results of leaf one wilting index with one-way ANOVA

|    | 平方和      | df | 均方       | F   | 显著性     |
|----|----------|----|----------|-----|---------|
| 组间 | 0.087 93 | 1  | 0.087 93 | 1.2 | 0.292 2 |
| 组内 | 1.027 46 | 14 | 0.073 39 |     |         |
| 总数 | 1.115 39 | 15 |          |     |         |

表 3 叶片 2 萎蔫指数单因素方差分析结果

Tab.3 Analysis results of leaf two wilting index with one-way ANOVA

|    | 平方和      | df | 均方       | F    | 显著性     |
|----|----------|----|----------|------|---------|
| 组间 | 0.000 71 | 1  | 0.000 71 | 0.02 | 0.903 6 |
| 组内 | 0.653 99 | 14 | 0.046 71 |      |         |
| 总数 | 0.654 7  | 15 |          |      |         |

具有普遍适用性。

3 结论

(1)以黄瓜和绿皮西葫芦的幼苗为试验对象,基于 TOF 摄像机搭建了一套叶态实时采集装置,采用控制植株根部水分的方法,使叶片处于多种萎蔫状态,采集其 3D 图像,利用自定义的萎蔫指数公式计算出每个状态的萎蔫指数。

(2)通过对单一叶片和同一植株不同叶片的叶片状态与萎蔫指数的关系进行定性以及定量分析,可以看出,利用 TOF 摄像机进行叶态萎蔫辨识是可行的。

(3)叶片的萎蔫状况受多方面因素的影响,因此本文采用了控制变量法,针对户外自然生长的植株,还需做进一步的研究。

参 考 文 献

1 ZHANG Y L, ZHANG H Z, DU M W, et al. Leaf wilting movement can protect water-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants against photoinhibition of photosynthesis and maintain carbon assimilation in the field[J]. Journal of Plant Biology, 2010, 53(1): 52–60.

2 CAI X, SUN Y, ZHAO Y, et al. Smart detection of leaf wilting by 3D image processing and 2D Fourier transform[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 90: 68–75.

3 张慧娟, 赵燕东, 孙宇瑞, 等. 基于 3-D 图像的植物亏水胁迫萎蔫体态辨识方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 154–158.

ZHANG Huijuan, ZHAO Yandong, SUN Yurui, et al. Identification of plant morphology wilt-induced by water stress with 3-D based image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 154–158. (in Chinese)

4 赵燕东, 荣斐, 刘圣波, 等. 基于 2DFT 的植物叶片萎蔫程度与微环境因素相关性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 253–258.

ZHAO Yandong, RONG Fei, LIU Shengbo, et al. Correlation between wilting index of plant morphology defined by 2DFT spectrum and micro-environmental factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 253–258. (in Chinese)

5 PATHAN S M, LEE J D, SLEPER D A, et al. Two soybean plant introductions display slow leaf wilting and reduced yield loss under drought[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014, 200(3): 231–236.

6 赵燕东, 刘贺, 刘卫平. 基于叶片分形维数的植物亏水胁迫萎蔫体态测量方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 191–195.

ZHAO Yandong, LIU He, LIU Weiping. Measurement of plant leaf physical configuration under water deficit stress using fractal dimension[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 191–195. (in Chinese)

7 苗腾, 郭新宇, 温维亮, 等. 植物叶片萎蔫过程的物理表示方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 253–258.

MIAO Teng, GUO Xinyu, WEN Weiliang, et al. Physical description of plant leaf wilting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 253–258. (in Chinese)

8 ASTACIO M G, VAN IERSEL M W. Concentrated exogenous abscisic acid drenches reduce root hydraulic conductance and cause wilting in tomato[J]. Hort Science, 2011, 46(12): 1640–1645.

9 赵燕东, 马扬飞, 王勇志. 绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 46–50.

ZHAO Yandong, MA Yangfei, WANG Yongzhi. Green land precision irrigation control system and analysis of optimal irrigation

amount[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 46–50. (in Chinese)

10 SILIM S, NASH R, REYNARD D, et al. Leaf gas exchange and water potential responses to drought in nine poplar (*Populus spp.*) clones with contrasting drought tolerance[J]. Trees, 2009, 23(5): 959–969.

11 CHENG T, RIVARD B, SANCHEZ-AZOFEIFA A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 659–670.

12 HUSSMANN S, HENABSKI A, EDELER T. Real-time motion artifact suppression in tof camera systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1682–1690.

13 VAN DEN BERGH M, VAN GOOL L. Combining RGB and TOF cameras for real-time 3D hand gesture interaction[C] // 2011 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 2011: 66–72.

14 李兴东, 陈超, 李满天, 等. 飞行时间法三维摄像机标定与误差补偿[J]. 机械与电子, 2013 (11): 37–40.  
LI Xingdong, CHEN Chao, LI Mantian, et al. Calibration and error compensation with time of flight 3D camera[J]. Machinery & Electronics, 2013 (11): 37–40. (in Chinese)

15 赵科, 余洪山, 王耀南, 等. 基于视觉映射的三维相机信息可视化改善方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(6): 529–534.  
ZHAO Ke, YU Hongshan, WANG Yaonan, et al. Improved 3D information visualization method for TOF camera based on vision projection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(6): 529–534. (in Chinese)

16 SONG Y, GLASBEY C A, POLDER G, et al. Non-destructive automatic leaf area measurements by combining stereo and time-of-flight images[J]. IET Computer Vision, 2014, 8(5): 391–403.

17 童晶, 向学勤, 田洪波, 等. 利用飞行时间三维相机的非刚体形状三维重建[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(3): 377–384.  
TONG Jing, XIANG Xueqin, TIAN Hongbo, et al. 3D reconstruction of non-rigid shapes using one TOF camera[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(3): 377–384. (in Chinese)

18 夏群峰, 彭勇刚. 基于视觉的机器人抓取系统应用研究综述[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 697–701.  
XIA Qunfeng, PENG Yonggang. Review on application research of robots scraping system based on visual[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2014, 31(6): 697–701. (in Chinese)

19 张新, 赵燕东, 郑力嘉, 等. 基于三维机器视觉的植物叶片萎蔫预测模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 260–267.  
ZHANG Xin, ZHAO Yandong, ZHENG Lijia, et al. Prediction model of plant leaf wilting using 3-D machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 260–267. (in Chinese)

20 PARK J Y, CHOI J H, KIM B M, et al. Determination of acetamiprid residues in zucchini grown under greenhouse conditions; application to behavioral dynamics[J]. Biomedical Chromatography, 2011, 25(1–2): 136–146.

21 员玉良, 盛文溢, 孙宇瑞. 基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 247–252.  
YUN Yuliang, SHENG Wenyi, SUN Yurui. Method for observing stem water storage dynamics based on a sap flow rate sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 247–252. (in Chinese)