

玉米叶片生长状态的双目立体视觉监测技术*

王传宇 郭新宇 肖伯祥 杜建军 王 琥

(北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 研究了使用双目立体视觉技术监测玉米叶片运动的可行性,视觉监测系统包括一个能够垂直升降和水平移动的支架,用于支撑双目相机连续监测被试样品。采用白色荧光小球作为标志物,简化图像算法的同时增加了三维坐标测量精度。图像处理过程中采用亚像素边缘检测算法,有效地提高了立体匹配的精度。仿真实验结果表明,系统测量误差可达0.013 9 cm,能够检测叶片微小的位置变化。

关键词: 玉米叶片 双目立体视觉 生长监测 图像处理 亚像素

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0268-06

引言

随着技术手段的进步,对于生命现象的观察与研究进一步向精细化、定量化发展,在农业领域一些集成了光、机、电等多种技术的监测方法已经在生产、科研等关键环节发挥作用,其中,机器视觉技术以其快速、无损、非接触等优势,在农产品品质检测、作物生长状态监测、农机具自动导航、作物病虫害识别等方面取得了很好的结果^[1-9]。

机器视觉技术能够实时、连续的获取植物生长数字化信息^[10-11],对于了解植物生长发育过程、制定合理的促控措施有重要的作用。马稚昱等^[12]采用机器视觉及图像处理技术对多株植物生长信息进行了监测研究。在图像处理过程中采用一种基于亚像素和区域匹配的误差消除估计 EEC (Estimation error cancel method) 图像分析的处理方法,有效地提高了检测精度。利用该系统对菊花的茎生长进行了监测分析,发现白天菊花的茎生长速率要小于夜间的生长速率。

植物生长在三维世界中,采用二维图像监测作物生长的方法在作物生物量较小、在三维空间中形态变化不大时一般能够发挥较好的作用,对于形态稍微复杂一些的作物器官如玉米叶片,很难保证被监测叶片的运动都在摄像机正投影的平面内。

双目立体视觉技术基本原理是从两个视点观察同一景物以获取立体像对,匹配出相应像点,从而计

算出视差并获得三维信息^[13-17]。

双目立体视觉技术的难点在于左右两幅对应图像的立体匹配,玉米叶片的颜色和纹理较为均一,文献^[13]中基于特征点的立体匹配方法应用于玉米叶片很难得到致密的三维点云,不易获取目标点的三维坐标。文献^[16-17]使用了基于模拟退火和动态规划的全局匹配方法能够获取玉米叶片致密的三维点云,但全局最优化方法的求解误差较大,对于玉米叶片细微的运动稍显粗糙。文献^[14-15]所述方法,针对叶片边缘的褶皱起伏,不具备通用性。针对已有文献方法的不足,为实现监测玉米叶片运动状态的目的,本文采用轻质荧光小球附着在玉米叶片上作为标志物,从而简化立体匹配算法的复杂度,同时提高了目标点三维重建的精度。

1 系统设计

监测系统包括硬件支撑结构以及后端的图像处理算法,硬件支撑结构主要功能是在玉米冠层内创造一个相对稳定的图像获取环境,并能够以较高的帧速捕获立体图像对。后端软件算法主要完成图像处理、三维重建、可视化等功能。

1.1 系统硬件组成与原理

1.1.1 系统硬件的组成结构与功能

本系统由双目相机、滑动轴、滑杆、支架、图像采集卡、数据线和计算机构成,如图1所示。图像采集使用北京微视 MVC1000SAM-GE30ST 型双目相

收稿日期: 2013-10-23 修回日期: 2013-12-27

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102404)、国家自然科学基金资助项目(31171454)和北京市农林科学院自主创新专项资助项目(KJCX201204007)

作者简介: 王传宇,助理研究员,主要从事基于图像的作物长势监测研究,E-mail: wangcy@necita.org.cn

通讯作者: 郭新宇,研究员,主要从事数字植物研究,E-mail: guoxy@necita.org.cn

机,镜头为 PENTAX 8.5 mm 镜头,有效像素 $1\,280 \times 1\,024$,传感器尺寸为 1/2 英寸,像素尺寸 $5.2\,\mu\text{m} \times 5.2\,\mu\text{m}$ 。获取图像时通过滑动轴将双目相机移至被监测叶片上方,相机的垂直高度由支撑滑动杆的三脚架调整,相机距离叶片 30 ~ 50 cm 效果较好。获取图像时保持相机内外参数不变,尽量选择光照条件较好的晴天,使用较大的光圈,保证获取的图像有较好的景深。

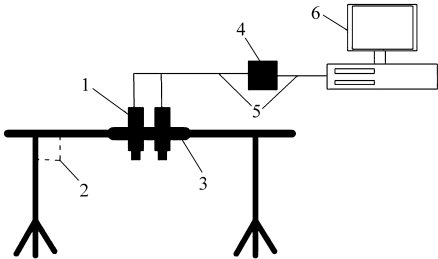


图1 双目立体视觉系统
Fig.1 Binocular stereo vision system

1. 双目相机 2. 支架 3. 滑动轴 4. 视频采集卡 5. 数据线
6. 计算机

1.1.2 双目立体视觉的原理图

设标志物上一点 $M(X,Y,Z)$, $m_1(x_1,y_1)$ 、 $m_2(x_2,y_2)$ 分别为 M 点在左右两幅图像上投影点的图像坐标,左右相机的投影矩阵为 P_i ,有

$$P_i = \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{12}^i & a_{13}^i & a_{14}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & a_{23}^i & a_{24}^i \\ a_{31}^i & a_{32}^i & a_{33}^i & a_{34}^i \end{bmatrix} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

则

$$w_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = P_i \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i=1,2) \quad (2)$$

其中: $(x_1,y_1,1)$ 、 $(x_2,y_2,1)$ 分别为 m_1 、 m_2 在各自图像中的齐次坐标; $(X,Y,Z,1)$ 为 $M(X,Y,Z)$ 点世界坐标下的齐次坐标; w_i 为非零参数; a_{mn}^i ($i=1,2$; $m=1,2,3$; $n=1,2,3,4$) 为投影矩阵 P_i ($i=1,2$) 中的元素,代表摄像机的内参矩阵(焦距、畸变)和外参矩阵(平移、旋转)。根据被测点 M 在相机像面上的坐标 $m_1(x_1,y_1)$ 、 $m_2(x_2,y_2)$ 和式(2),就可以求出未知点 M 的世界坐标 (X,Y,Z)

$$\begin{bmatrix} a_{11}^i - a_{31}^i x_i & a_{12}^i - a_{32}^i x_i & a_{13}^i - a_{33}^i x_i \\ a_{21}^i - a_{31}^i y_i & a_{22}^i - a_{32}^i y_i & a_{23}^i - a_{33}^i y_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i a_{14}^i \\ y_i a_{24}^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

相机投影矩阵 P_i 的求取采用 Zhang 平面模板标定法^[18],篇幅所限不再赘述。

1.2 图像处理算法

算法开发所用的计算机采用 Pentium(R) D 处理器,内存 2.0 GB,软件由 C++ 语言编写,计算机视觉库为 OpenCV。利用上述双目立体视觉系统采集数据,以系统支持 30 帧/s 的速度获取图像。实验结束后,对采集得到的数据进行处理,获取植物生长的状态信息。叶片运动监测算法的流程图如图 2 所示。

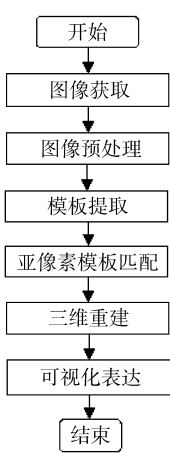


图2 图像处理流程图
Fig.2 Flow chat of the image processing

1.2.1 图像获取与预处理

植物生长监测上常采用固定形式的模板放置在被测植株表面,以模板位置的改变表示植株该点上坐标的变化。考虑到田间复杂的环境和植株本身,本文以直径 0.35 cm 的荧光球作为标志点,荧光球附着在一个黑色圆片上,便于放置玉米叶片上不同部位。根据监测目的的不同,可放置一到多个标志点。将双目相机移动至适当位置,使得标记模板在左右两相机的视野内。设置图像采集时间间隔为 60 s,图像自动存储到计算机内以备后续处理。

初始的图像中包含了玉米叶片、标志点、土壤背景等信息,如图 3 所示。



图3 玉米叶片图像
Fig.3 Maize leaf image

土壤背景作为冗余信息会对后续图像处理造成影响。去除绿色植株图像中土壤背景的方法较多,常采用的有阈值法:利用土壤与植株灰度颜色的差

异;超绿法:绿色植株上像素满足 $2G > (B + R)$ 这一条件。在本研究中去掉土壤背景的同时还需要保留标志点区域,传统方法会去除掉一部分标志点,影响最后的计算精度。本文采用决策曲面方法进行图像分割,能够较完整保留叶片和标志点像素,决策曲面算法公式为

$$C = \frac{R^2}{V^2} + \frac{(1 - G)^2}{(YB + U)^2}$$

(4)

其中, R 、 G 、 B 是红绿蓝 3 种颜色归一化后的强度值,其取值范围为 0 到 1,图像的原始颜色强度红色 r 、绿色 g 、蓝色 b 的取值范围是 0 到 255,对应归一化后的 $R = r/255$, $G = g/255$, $B = b/255$; V 、 Y 、 U 是描述曲面形状的参数, V 是还能够感知到绿色时红色所能取的最大强度值,即 $B = 0$, $G = 1$ 时 R 的取值。 Y 是曲面边界在红绿平面的倾斜指数。 U 是当红蓝通道都为零时,能够感知到绿色时的最大绿色强度值与最小值之差。 V 、 Y 、 U 为常值,其取值分别为 $V = 0.85$, $Y = -0.37$, $U = 0.74$ 。将归一化的 R 、 G 、 B 值代入决策曲面算法公式计算得到 C 值,若 C 值大于等于 1 则此像素属于叶片区域,应该保留,若 C 值小于 1 则此像素属于土壤背景区域,应该舍弃。

对分割后的图像进行二值化,土壤背景中仍有零星的孤岛像素保留下来,通过面积阈值滤波进一步去除这些孤岛像素,最终图像中只包含目标区域,如图 4 所示。



图 4 去除背景像素的图像

Fig. 4 Background pixels removed image

1. 2. 2 标志物提取

荧光球标志物的亮度明显高于叶片等周围环境,可通过边缘提取算法获得荧光球标志物的轮廓,如果小球到相机是正投影,那么小球图像的轮廓为圆形,但玉米叶片有一个较大的弯曲,使得部分荧光球的轮廓在图像上呈椭圆形。对上一步骤中得到的图像利用 Canny 算子进行边缘检测,然后再采用以下判别标准进行椭圆标志物的识别:

(1) 边缘是否闭合。标志点边缘是闭合曲线,通过查找闭合轮廓去除那些由纹理、阴影等造成的不闭合曲线。

(2) 亮度依据。标志物亮度高于背景,通过灰度阈值去除暗区域的闭合曲线。

(3) 轮廓面积。标志物在图像上的像素面积大小相对固定,由此可去除背景中轮廓过大的物体和轮廓较小的噪点。

(4) 似圆度判断。圆形标志点由于视觉畸变形成了椭圆,相较于图像中自然物体的轮廓更接近于圆形,可通过闭合曲线区域的似圆度判断该区域是否为标志物。似圆度计算方法为 $D^2/(4\pi A)$,其中 D 为该区域的周长, A 为该区域的面积,计算值越接近 1 则该区域形状越接近圆形。

利用这些条件对上一步骤中的图像进行约束,得到只包含标志点的二值图像,如图 5 所示。



图 5 标志物二值图像

Fig. 5 Binary image of template

1. 2. 3 标志物边缘亚像素求精

获得标志物边缘像素后,可通过求取边缘像素的重心点作为左右两幅立体图像对的匹配点,根据事先标定好的摄像机内外参数即可获得该点的三维坐标。上一步骤求取的标志物边缘较为粗略,直接用于计算结果会出现较大误差,叶片的某些运动是细微的,这种误差会影响系统对叶片细微运动的感知。为了进一步提高精度,采用边缘亚像素求精算法,首先对亚像素边缘定位,然后利用梯度幅值法对边缘点进行调整,从而得到亚像素边缘。

梯度幅值法具体过程:

(1) 在每个像素边缘点上计算 X 和 Y 方向的梯度分量,由这两个分量计算每个边缘点的梯度幅值 $G(x,y)$ 和梯度方向 $\alpha(x,y)$ 。具体计算方法为:

梯度幅值

$$G(x,y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

(5)

梯度方向

$$\alpha(x,y) = \arctan(G_y/G_x)$$

(6)

计算 G_x 和 G_y 时所使用的卷积模板具体形式如图 6 所示。

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

图 6 梯度卷积模板

Fig. 6 Gradient convolute template

(2) 根据 $G(x,y)$ 和给定的阈值 T ,在梯度方向上确定满足 $G(x,y) > T$ 的取值区间。

假设像素边缘点 (x,y) ,梯度方向为 $\alpha(x,y)$,当 $\alpha < \alpha(x,y) < \beta$ (图7中 $\alpha = -\pi/2 + \arctan(1/3)$, $\beta = -\arctan(1/3)$)时,沿梯度方向和反方向判断邻接的2个点 $(x-1,y-1)$ 和 $(x+1,y+1)$ 是否大于阈值 T 并求得距离分量。

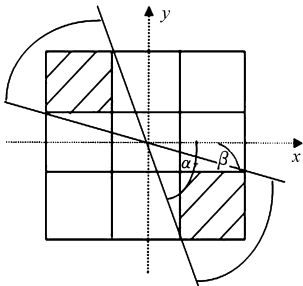


图7 梯度方向点
Fig. 7 Points in the direction of grads

(3) 利用梯度分量 G_x 和 G_y 作为权值校正像素边缘得到亚像素边缘,校正公式为

$$\begin{cases} \Delta d_x = \sum_{i=1}^n G_{xi} d_{xi} / \sum_{i=1}^n G_{xi} \\ \Delta d_y = \sum_{i=1}^n G_{yi} d_{yi} / \sum_{i=1}^n G_{yi} \end{cases} \quad (7)$$

式中 d_{xi} ——像素点沿梯度方向与粗定位边缘点的距离 X 分量
 d_{yi} ——像素点沿梯度方向与粗定位边缘点的距离 Y 分量
 G_{xi} —— X 方向梯度分量
 G_{yi} —— Y 方向梯度分量
 n ——沿梯度方向 $G(x,y)_i > T$ 的像素点数

如图8所示,经过亚像素边缘求精后的标志物模板边缘图像,边缘更能够描述图像中标志物与背景的位置分界,由该边缘求得的重心匹配点匹配精度进一步提高。图8a是亚像素求精之后的模板边缘,边缘的左下方有一凹陷区域,对应图8b图像上相同位置像素灰度比正常荧光球区域低,这可能是荧光球的加工缺陷造成,亚像素求精算法能够识别这种缺陷,并能正确提取边缘。

2 玉米叶片运动信息的测量及结果分析

2.1 测量精度分析

双目立体视觉系统的测量精度受到诸多因素的影响,如相机分辨率、与被测量物体的距离、两相机所成的角度、标定算法的精度等,很难通过理论推导出计算出特定立体视觉系统的测量精度。为了测试双目立体视觉系统的精度和可靠性,设计了一个专门的实验环境,如图9所示,带有标志点的黑板垂直放置在水平位移台上,位移台在步进电动机驱动下作水平运动,双目相机水平放置,朝向与黑板垂直,位

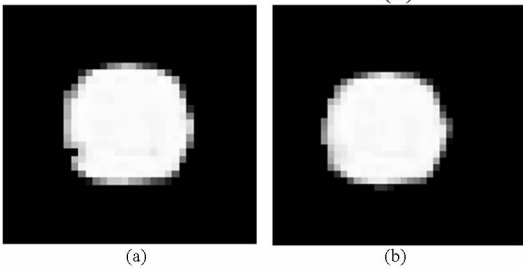


图8 亚像素边缘求精后的标志物
Fig. 8 Template edge after sub-pixel refine
(a) 亚像素求精后的模板边缘
(b) 亚像素求精之前的模板边缘

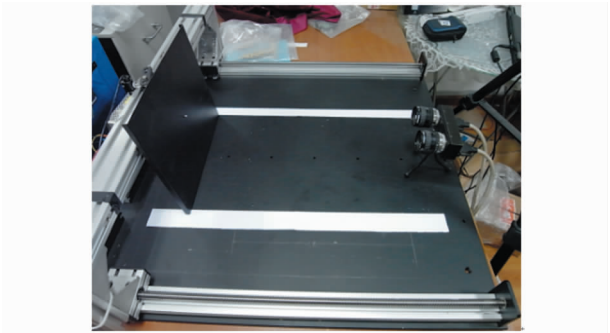


图9 精度测试示意图
Fig. 9 Schematic of accuracy testing

移台下方设置有标尺。开始时双目相机与黑板距离为 p ,通过水平位移台移动黑板到下述几个预设位置点, $p+1\text{ cm}$ 、 $p+2\text{ cm}$ 、 $p+3\text{ cm}$ 、 $p+5\text{ cm}$ 、 $p+7\text{ cm}$ 、 $p+9\text{ cm}$ 。

分别计算在几个预设位置标志点的三维坐标。结果如表1所示, X,Y,Z 为预设点的三维坐标值,距离值为各个预设点到双目相机坐标系原点的距离,相对距离为各预设点到第一个预设点的距离。

表1 仿真计算结果
Tab. 1 Result of simulation computation

测试点	X	Y	Z	距离	相对距离
p	0.621 522	1.020 58	-14.208 7	14.258 86	0
$p+1\text{ cm}$	0.641 343	1.107 05	-14.556 4	14.612 52	0.353 659
$p+2\text{ cm}$	0.728 676	1.136 24	-14.896 9	14.957 93	0.699 071
$p+3\text{ cm}$	0.776 305	1.159 87	-15.263 7	15.327 38	1.068 519
$p+5\text{ cm}$	0.800 921	1.213 35	-16.001 2	16.067 11	1.808 254
$p+7\text{ cm}$	0.813 348	1.270 49	-16.747 5	16.815 30	2.556 446
$p+9\text{ cm}$	0.788 134	1.326 17	-17.452 3	17.520 35	3.261 492

由表1中数据计算,真实世界中1 cm与双目相机坐标系下0.358 102相对应。相邻测量点之间的距离误差绝对值均值为0.004 98,对应真实世界中的0.013 9 cm。测试中相机与标志板初始位置距离在50 cm左右,在这个范围内系统的测量误差已达到0.013 9 cm,能够满足玉米叶片运动监测所要求的测量精度。

2.2 玉米叶片生长监测

供试材料为玉米品种先育335,2013年6月17日播种,密度为60 000株/hm²,正常水肥处理。选择13叶期的玉米植株进行生长监测实验,此时玉米叶片的生长非常旺盛,植株体积迅速扩大,干重急剧增加。选择一未完全展开的可见叶片作为实验材料,将标志物粘贴在叶片上,使用本文所述系统连续监测植株生长,以1h为时间间隔计算该时间段内标志物在三维空间的位移量(cm/h),结果如图10所示。

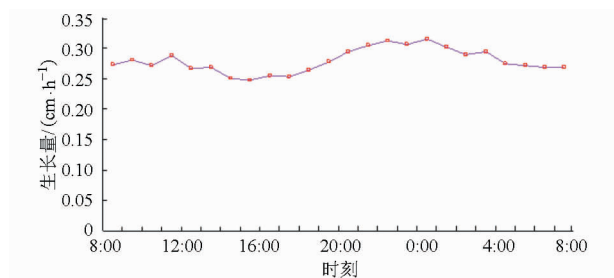


图10 玉米叶片位移量随时间的变化

Fig. 10 The time course of leaf movement

2.3 玉米叶片一天内运动监测

选择吐丝期玉米穗位上一叶作为观测对象,尽量选择无风条件下进行。从叶片中上部到叶尖均匀布置6个标志点,以8:00时的标志点位置为初始状态,分别记录10:00、14:00、16:00时的标志点位置,计算与初始状态各标志点三维位置的距离,结果如图11所示。从图中可以看出,14:00的标志点位置与8:00的标志点在靠近叶片尖端的3个点上,有较大的位移,尖端点达到0.579 cm,而10:00和16:00的数据没有明显的位置变化。究其原因,可能是由

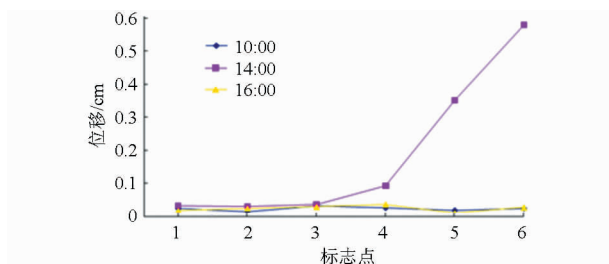


图11 一天内玉米叶片运动

Fig. 11 The leaf movement in one day

于正午时叶片蒸腾作用达到最大,细胞失水叶片整体向下披垂,而10:00和16:00时由于温度不高,蒸腾作用还没有使叶片失水下垂。玉米叶片中部的叶脉对叶片起到一定的支撑作用,特别是在叶片中下部,致使这种失水下垂现象在叶片尖端表现得更为明显。

3 结束语

设计并实现了用于玉米叶片运动监测的硬件结构与软件算法,使用荧光小球作为标志物简化了图像处理算法,增加了双目立体视觉三维坐标测量精度。仿真实验中系统测量精度可达0.013 9 cm。通过田间实验证明了本文所述运动监测系统对叶片在三维空间位移信息获取的可行性,为进一步分析叶片空间姿态所反映的作物生长和生理变化提供了数据获取手段。

受到双目视觉技术原理的限制,如果被测物体的形态变化较大,例如由于风力导致的叶片翻转和大范围位移,使标志点从相机的视野中消失,测量精度会受到很大影响。

参考文献

- 1 Howarth M S, Brandon J R, Searcy S W, et al. Estimation of tip shape for carrot classification by machine vision[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 53: 123–139.
- 2 Piotr M Szczypiński, Piotr Zapotoczny. Computer vision algorithm for barley kernel identification, orientation estimation and surface structure assessment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87(9): 32–38.
- 3 Pearson T C, Sehatzki T F. Machine vision system for automated detection of aflatoxin contaminated pistachios[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(6): 2248–2252.
- 4 Ni B, Paulsen M R, Reid J F. Size grading of corn kernels with machine vision[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1998, 14(5): 567–571.
- 5 Raphael Linker, Oded Cohen, Amos Naor. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81(2): 45–57.
- 6 Wang Qi, Wang Hui, Xie Lijuan, et al. Outdoor color rating of sweet cherries using computer vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87(9): 113–120.
- 7 Confalonieri R, Foi M, Casa R, et al. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 96: 67–74.
- 8 Ahmad I S, Reid J F. Evaluation of colour representations for maize images[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63: 185–196.
- 9 José R Romero, Pablo F Roncallo, Pavan C Akkiraju, et al. Using classification algorithms for predicting durum wheat yield in the province of Buenos Aires[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 96: 173–179.

10 Kacira M, Sase S, Okushima L. Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind induced ventilation[J]. Transactions of ASAE, 2004,47(6): 2059 – 2067.

11 Ishizuka T, Tanabata T, Takano M, et al. Kinetic measuring method of rice growth in tillering stage using automatic digital imaging system[J]. Environment Control in Biology, 2005, 43(2): 83 – 96.

12 马稚昱,清水浩,辜松. 基于机器视觉的菊花生长自动无损监测技术[J]. 农业工程学报,2010,26(09):203 – 209.
Ma Zhiyu,Hiroshi Shimizu, Gu Song. Non-destructive measurement system for plant growth information based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(9):203 – 209. (in Chinese)

13 Michio Kise, Zhang Qin. Reconstruction of a virtual 3D field scene from ground-based multi-spectral stereo imagery [C] //2006 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 063098,2006.

14 Hong Y Jeon, Lei Tian. Stereovision system and image processing algorithms for plant specific application[C] //2009 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 090047,2009.

15 王传宇,赵明,阎建河. 基于双目立体视觉的苗期玉米株形测量[J]. 农业机械学报,2009,40(5):144 – 148.
Wang Chuanyu,Zhao Ming, Yan Jianhe. Measurement of maize seedling morphological traits based on binocular stereo vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 144 – 148. (in Chinese)

16 Ran Nisim Lati, Sagi Filin, Hanan Eizenberg. Estimating plant growth parameters using an energy minimization-based stereovision model[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2013,98: 260 – 271.

17 Hans J Andersen, Lars Reng, Kristian Kirk. Geometric plant properties by relaxed stereo vision using simulated annealing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005,49(2):219 – 232.

18 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330 – 1334.

Maize Leaf Movement Monitoring Base on Binocular Stereo Vision

Wang Chuanyu Guo Xinyu Xiao Boxiang Du Jianjun Wang Xiao
(Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: A binocular stereo vision maize leaf motion monitoring system was proposed, the system includes a binocular camera, horizontal movement module, the vertical movement module, the image acquisition card, and a computer. The supporting structure holds camera above the measured maize leaf, and the camera is able to capture image pair at 30 f/s. An image processing program includes image acquisition, image pre-processing, markers extraction, sub-pixel edge refinement, 3D reconstruction and other modules. A fluorescent ball(diameter 0.35cm)with high reflectivity was chosen as a marker, and its intensity is higher than the background environment which makes it easier to extract contour of ball out of background. The spherical marker will keep its circular shape more or less after perspective projection. In order to further improve the accuracy of stereo matching, a sub-pixel edge detection method based on gradient magnitude was adopted. In the simulation experiment, the camera was set away from the measured object about 50 cm, the system measurement deviation was 0.013 9 cm, which is able to detect the small changes of leaf position. In field experiments, the actual measurement of the movement leaf caused by growth and physiological responses achieved the desired results.

Key words: Maize leaf Binocular stereo vision Growth monitoring Image processing Sub-pixel