

基于双目立体视觉技术的玉米叶片三维重建

王传宇¹, 赵明^{2*}, 阎建河¹, 周顺利¹, 张英华¹

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193; 2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 玉米叶片的三维形态特征是衡量叶片生物学特性的重要指标, 为了能够简捷、快速、准确的获得叶片的三维形态, 该研究以两个位置相对固定的摄像机组成双目立体视觉系统, 采用平面模板法定标摄像机内外参数, 照射结构光测量玉米叶片边缘与叶脉点的三维坐标, 对稀疏离散点进行 Cardinal 样条插值, 三角面片化插值点重建出部分叶片三维曲面, 旋转平移各部分三维曲面拼接成完整的叶片。试验结果表明该文所提出的方法不仅能够准确的重建玉米叶片三维结构, 同时具有无损、非接触、自动化程度高等优势。

关键词: 玉米叶片, 机器视觉, 三维重建, 立体拼接

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.04.033

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-04-0198-05

王传宇, 赵明, 阎建河, 等. 基于双目立体视觉技术的玉米叶片三维重建[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 198-202.
Wang Chuanyu, Zhao Ming, Yan Jianhe, et al. Three-dimensional reconstruction of maize leaves based on binocular stereovision system[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 198-202. (in Chinese with English abstract)

0 引言

叶片是玉米植株重要的光合器官, 叶片的三维形态与分布特征直接影响冠层的结构与功能, 因此能够快速、准确、简便的获取和重建玉米叶片三维结构具有十分重要的意义。依据实施手段的不同, 叶片三维重建可分为以下3种方法: 1) 基于数学模型, 郭新宇等人^[1]将参数化建模方法应用于重构叶片三维形态, 以较少的参数描述了复杂的叶片结构。肖伯祥等人^[2]研究了叶片形态建模中简化曲面网格算法。Christian Fournier 等人^[3]应用结构功能模型耦合干物质积累、光能利用率与叶片3D形态建成。模型方法应用的难点在于描述叶片不规则的形态变化存在难度, 过多的模型参数不利于实际操作。2) 叶片坐标测量, 马焜韬、郭焱、李保国等^[4-5]使用三维数字化仪对玉米植株进行三维测量和三维重建, 并分析了叶片方位分布规律, 距茎特定距离的叶面积垂直水平分布规律等。使用接触式三维数字化仪需要人工辅助, 操作繁琐复杂。3) 基于图像, 杨亮等人^[6]拍摄黄瓜叶片图像序列重建叶片三维结构, Quan Long 等人^[7]使用 SfM (structure from motion) 方法, 环绕拍摄物体多图像序列, 辅助人工编辑主干枝条, 重建出树木和花草的三维结构。基于图像的方法具有操作简便、快速、准确、无损、非接触等优点。特别是双目立体视觉技术, 原理简

单实施方便, 在三维重建与景深测量中应用广泛。双目立体视觉由不同位置的两台或者一台摄像机经过移动或旋转拍摄同一幅场景, 通过计算空间点在两幅图像中的视差来获得该点的三维坐标。近来已有双目立体视觉技术在农业领域上成功应用的报道, 吕朝辉等^[8]探索了立体视觉技术在测定秧苗直立度中的应用, Kise 等^[9]将双目立体视觉用于拖拉机在作物行间自动行走的导航系统, Rovira Mas 等^[10]以作物立体空间多对图像重建了田间作物3D景象, He 等^[11]对移栽机移栽秧苗时秧苗的物理参数进行立体估计, Wu 等^[12]利用立体视觉技术提取生猪的3D外形。本文将应用双目立体视觉技术结合结构光法为重建玉米叶片三维结构提供一种快速、准确、自动化程度高的解决方案。

1 原理及方法

1.1 双目立体视觉组成与原理

图1为系统组成结构示意图, 本系统硬件平台由两个 samsung scc-b2311 型彩色摄像机(分辨率 704×576)、两个 Fujinon fy28v8m 镜头(焦距 2.8~8.0 mm, 最大光圈 $F=0.95$)、Vec-b5a01 16bit 便携视频采集卡(780×510, 30 fps)、HP nx9040 型便携计算机、摄像机固定架等组成。软件整体开发环境为 VC.net 2003, 图像处理软件包为 OpenCV1.0, 三维重建及可视化采用 VTK5.0(visualization toolkit)。

图2为双目立体视觉的原理图, O_1 、 O_2 分别为摄像机 A、B 的镜头中心。对于空间物体表面任意一点 $M(X, Y, Z)$, 确定在 A 摄像机图像 I_1 上的点 $m_1(x_1, y_1)$ 与在 B 摄像机图像 I_2 上的点 $m_2(x_2, y_2)$ 是空间同一点 M 的图像点(称 m_1, m_2 为点 M 的同名像点), 则 M 点的空间位置可由 O_1m_1 与 O_2m_2 两直线的交点唯一确定。

收稿日期: 2008-09-25 修订日期: 2009-11-23

项目基金: 国家高新技术研究发展计划(“863”计划)项目(2006AA10Z272)

作者简介: 王传宇(1981-), 男, 吉林松原人, 博士生, 主要从事机器视觉技术在农业领域的应用研究。北京 中国农业大学农学与生物技术学院, 100193。Email: worchin@gmail.com

*通信作者: 赵明(1955-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。北京 中国农业科学院作物科学研究所, 100081。Email: zhaomingcau@163.net

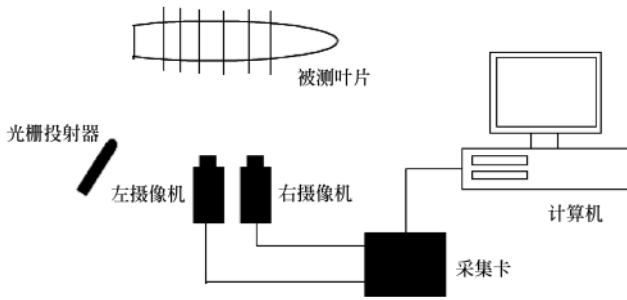


图 1 系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of hardware configurations of binocular stereovision system

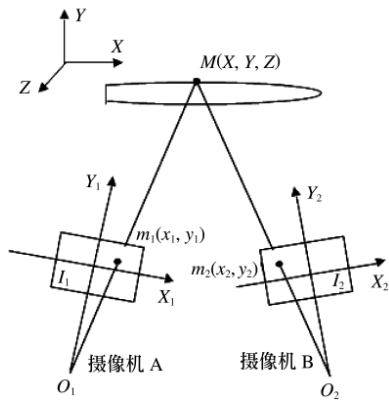


图 2 双目立体视觉原理

Fig.2 Theory of binocular stereovision

设 A、B 摄像机的投影矩阵为 $P_i (i=1, 2)$ ，其中

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

则

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

式中： $(x_1, y_1, 1)$ 、 $(x_2, y_2, 1)$ ——分别为 $m_1(x_1, y_1)$ 、 $m_2(x_2, y_2)$ 在各自图像中的齐次坐标； $(X, Y, Z, 1)$ —— $M(X, Y, Z)$ 点世界坐标下的齐次坐标； w_i ——非零参数； $a_{mn}^k (k=1, 2; m=1, 2, 3; n=1, 2, 3, 4)$ 为投影矩阵 $P_i (i=1, 2)$ 中的元素，表示摄像机平移、旋转、畸变、焦距等参数。根据被测点 M 在摄像机像面上的坐标 $m_1(x_1, y_1)$ 、 $m_2(x_2, y_2)$ 和式 (2)，就可以求出未知点 M 的世界坐标 (X, Y, Z)

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

式 (3) 是一个过定方程，可用最小二乘法求解。

1.2 摄像机的标定

摄像机的投影矩阵 P_i 由摄像机的内外参数决定，

$P_i = A[R T]$ 。其中 R 为旋转矩阵， T 为平移向量， A 为摄像机的内参矩阵，主要包括图像中心坐标（也称主点坐标）、相机的有效焦距和透镜的畸变失真系数、不确定性图像尺度因子等；而外部参数的标定是确定摄像机坐标系相对某一世界坐标系的三维位置和方向关系，可用 3×3 的旋转矩阵和 3×1 的平移向量来表示。在基于多摄像机的视觉系统中，外部参数表征摄像机之间的坐标变换关系，因此也需要标定。标定结果的好坏直接影响着 3D 测量和三维重建的精度。根据标定方式的不同，摄像机标定技术一般可以分为三类：传统标定方法、基于主动视觉的标定方法和自标定方法。由于后两种方法需要知道摄像机的运动参数或者鲁棒性比较差等限制因素，结合本研究的实际情况选择传统标定法。传统摄像机标定方法是指用一个结构已知、精度很高的标定物作为空间参照物，通过空间点和图像点之间的对应关系，建立摄像机模型参数的约束，利用一定的算法获得摄像机模型的内外参数。Tsai 标定算法、Weng 迭代标定算法、Zhang 平面模板标定算法是比较成熟的标定算法^[13-15]。特别是 Zhang 平面模板标定法：标定板制作简单、容易操作、精度高，比较适合本研究的实际情况。用 9 行 7 列的国际象棋棋盘格作为标定板，位置相对固定的两台摄像机分别拍摄 20 幅图像，得到两摄像机的内参矩阵 A_1 、 A_2 。再用两摄像机拍摄同一位置标定板获得 5 幅图像，得到两摄像机的旋转平移矩阵 R_1 、 T_1 、 R_2 、 T_2 ，为了以后计算方便，按照式 (4) 把世界坐标系原点平移到左摄像机。

$$R = R_2 R_1^{-1}, \quad T = T_2 - R_2 R_1^{-1} T_1 \quad (4)$$

最终得到以左摄像机为世界坐标原点的左右摄像机投影矩阵

$$P_1 = \begin{bmatrix} 743.23 & 0.00 & 351.50 & 0.00 \\ 0.00 & 790.34 & 287.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 764.39 & 21.46 & 373.38 & 6.03e+004 \\ -10.77 & 836.36 & 244.64 & -4.17e+004 \\ -0.03 & 0.05 & 0.99 & -11.93 \end{bmatrix} \quad (6)$$

计算重投影误差可以检验投影矩阵的精度，重投影误差是指：以标定板的世界坐标和投影矩阵计算标定板上特征点在图像上的理论坐标与实际坐标的差，重投影误差以像素为单位。经计算，左摄像机的重投影误差为 0.27，右摄像机的重投影误差为 0.32。这样的投影误差完全可以满足叶片 3D 测量和三维重建的需要。

1.3 图像的获取与特征提取

为了降低系统的复杂度去除田间光线和背景的干扰，本研究将玉米植株放置在实验室内测量，光照充分、背景颜色与植株差异明显将有利于图像处理。左右两摄像机先拍摄背景图像后再拍摄叶片图像，用背景差分法提取叶片，Canny 边缘算子提取叶片两个边缘和叶脉以备立体匹配之用。立体匹配就是分别在两幅对应图像上找到被测物体的基元（点）的对应关系，立体匹配是立体视觉中最关键、最困难的一步。由于被测叶片的颜色分布比较均一，轮廓变化也不明显，不容易实施区域匹配，

本文采用特征点立体匹配法,选择叶片边缘以及叶脉上的点作为匹配候选点,按照外极线几何约束理论,左右图像上的匹配点应该在对应极线上,但由于两摄像机拍摄角度、光线、信号噪声、镜头非线性畸变等因素影响,在计算基础矩阵时存在一定误差,无法通过外极线匹配对应点。为了增加匹配速度和准确性而引入结构光法,所谓结构光法即用带有光栅的激光器发射具有一定形状的激光照射到被测物体表面,光线被物体表面所调制。本文采用与叶脉方向垂直的具有固定间隔的条形结构光,摄像机首先拍摄叶片图像后再拍摄照射结构光的叶片图像,用带有光栅的叶片图像减去原始叶片图像即可得到叶片上的结构光坐标,结合 Canny 边缘提取所获得的叶片边缘、叶脉图像点坐标,二者取交集即可得到光栅所标识的特征点,结果如图 3 所示。

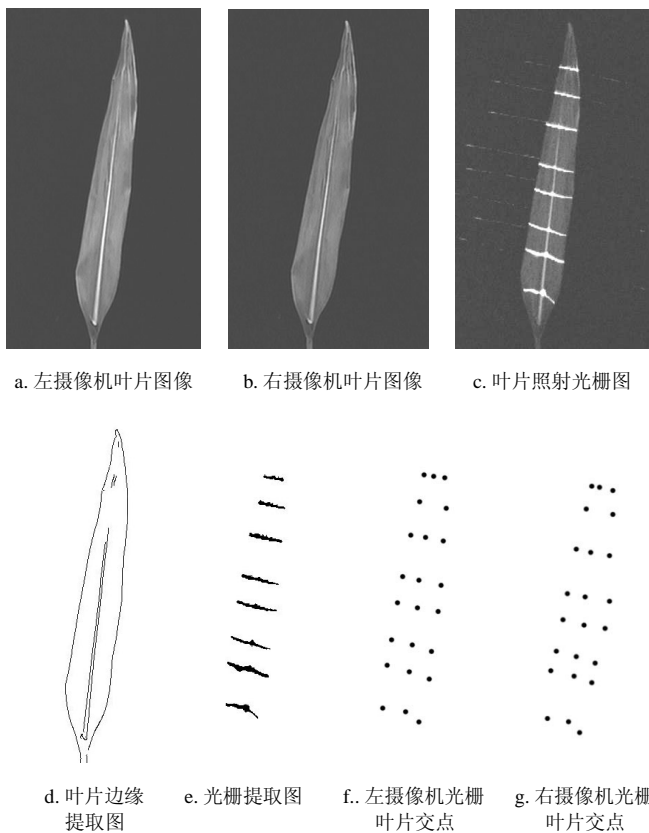


图 3 图像处理与特征点选取

Fig.3 Image processing and feature points abstraction

1.4 三维重建与立体拼接

由叶片两端的端点与取均值简化后的光栅标识点结合式(3)即可计算出叶片边缘、叶脉上点的三维坐标,对这些稀疏点插值、三角面片化可得到叶片曲面。Cardinal 样条是插值分段三次曲线,1个 Cardinal 样条可由4个连续控制点完全确定,中间2个控制点是曲线段端点,其他两个点用于计算曲线段端点斜率,Cardinal 样条能够用较少的插值点产生光滑的曲线段,因此本文采用 Cardinal 样条作为插值函数。

经过插值后两个叶片边缘点序列与叶脉点序列包含点数量相同,选择边缘上两点与叶脉上一点组成三角形,再由叶脉上两点与边缘上一点组成三角形,如此反复将

点序列三角面片化即可得到叶片的三维图像。一般情况下玉米叶片呈狭长分布,植株中部叶片弯曲程度比较大,不能一次测量出整个叶片的三维全貌,须分步测量并拼接前后多次测量的结果。本文采用“特征点”法进行立体拼接,主要步骤如下:前后两次不同视角、不同位置的测量中重复部分特征点的相对三维关系(各点之间的距离)是不变的,因此可以找到前后两次测量中重复部分的匹配点集 $P=\{p_j/p_j \in P, j=1, 2, \dots, n\}$ 和 $Q=\{q_j/q_j \in Q, j=1, 2, \dots, n\}$,假设在两个视角下获得的叶片曲面三维数据点云具有部分重叠区域,那么重叠区域中的标志点在两个视角下的三维坐标满足 $Q=RP+T$ 的转换关系,其中 R 为旋转矩阵 T 为平移向量。因此我们的目的就是要找到一对 RT ,使得式(7)所示的目标函数最小。

$$E = \sum_{j=1}^n \|q_j - (Rp_j + T)\|^2 \quad (7)$$

设 $\tilde{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$, $\tilde{p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j$,将 $q'_j = q_j - \tilde{q}$, $p'_j = p_j - \tilde{p}$ 带入式(7),得到式(8)

$$E = \sum_{j=1}^n \|q'_j - (Rp'_j)\|^2 \quad (8)$$

式(8)消除了平移向量的影响,可以用 SVD 法^[16-18]求解旋转矩阵,将 R 带入式(9)求解平移向量。

$$T = \tilde{q} - R\tilde{p} \quad (9)$$

将图 4a 中部分叶片曲面进行旋转、平移变换后与图 4b 中的部分叶片拼接成完整叶片,如图 4c 所示。

2 结果与分析

图 4c 为叶片三维重建结果,图 4e 为真实叶片形态。本文所提出的方法能够较真实的再现叶片三维形态,对于叶片边缘起伏与褶皱等细节能够完整保留。三维重建的精度越高,叶片上点的相对位置关系越逼近真实情况。因此可对重建结果进行 3D 测量并与实体叶片测量结果比较,验证系统的准确性。

为了检验系统的精度与可靠性,选择手工测量最容易得到的参数:叶长作为比较标准。供试材料为郑单 958,取样的生育时期为吐丝期,选定 10 株正常生长的植株,每株取下部叶片(叶序 5~8)、穗位叶、上部叶片(叶序 15 以上),用软尺测量。取虚拟叶片中脉上的离散插值点,计算累加各点欧氏距离之和作为虚拟叶片长度的近似值。结果如表 1 所示。

表 1 叶片长度的测量结果

Table 1 Measured results of leaves length

cm					
方法	软尺测量	本文方法	方法	软尺测量	本文方法
1	69.8	68.9	9	97.6	99.2
2	73.8	74.6	10	99.8	101.0
3	62.7	63.8	11	52.6	51.7
4	48.2	47.1	12	60.9	60.2
5	77.4	78.0	13	69.9	68.8
6	65.0	64.0	14	80.1	81.0
7	98.9	97.5	15	88.9	87.6
8	100.3	102.0			

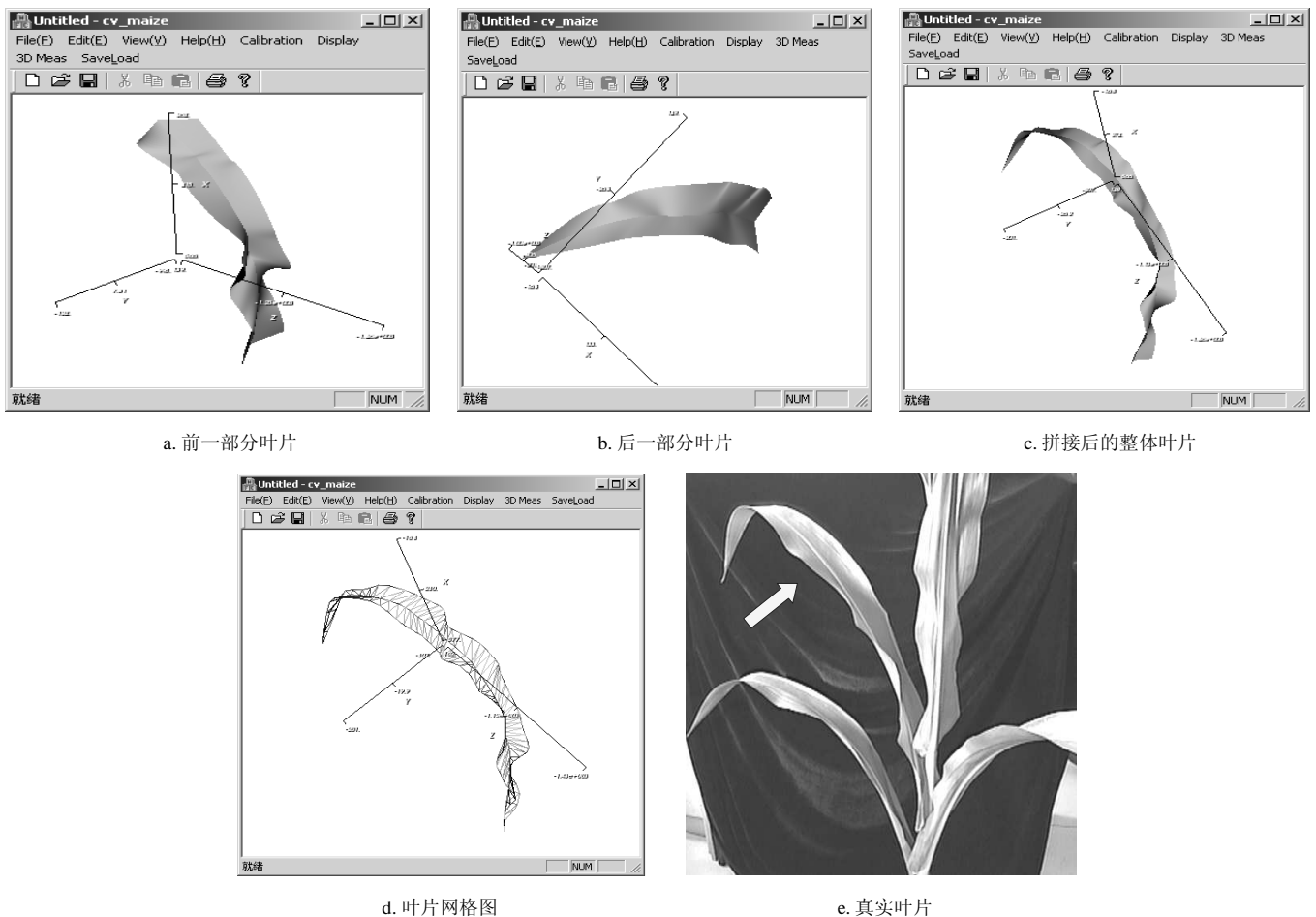


图4 三维重建与立体拼接
Fig.4 3D reconstruction and 3D stitch

在显著水平 $\alpha=0.05$ 水平下,由 t 检验 $|t|=0.11 < t_{\alpha/2}(14)$,认为两种叶长测量方法不存在显著性差异,即本文方法的测量精度完全可以满足玉米叶片三维数字化的要求。

系统的测量误差除了传感器噪声、摄像机模型等的影响,最主要来源于立体拼接与缝合,测量中分的次数越多,求取旋转矩阵和平移向量时误差越小,但摄像机传感器的误差积累也随之增多。一般情况下,对于植株上部和下部弯曲较小的叶片一步测量即可,对于中部弯曲和长度较大的叶片,3次测量的结果比较理想。

由于结构光系统的限制,在整个植株上照射合适的结构光栅难度很大,对于整株玉米的数字化可以采用分别对叶片测量后再组装的策略,但这样在时间和空间的复杂性上将大大增加,因此适合整株水平上快速准确的立体匹配方法是整株测量的关键,有待进一步研究。

3 结论

本文以双目立体视觉技术在实验室条件下进行玉米叶片的三维重建与三维测量,引入结构光法增强立体匹配的精度和准确性,为了克服玉米叶片狭长、弯曲等特性对测量角度、测量范围带来的影响,采用多次测量立体拼接等策略分步完成。在不计准备玉米叶片时间的情况下,整个系统程序运行时间 2~3 min,用手持三维数

字化仪(型号 MicroScribe-3dx),叶片边缘与中脉上各测量 100 个点进行叶片三维重建则需 20 min 左右。

[参 考 文 献]

- [1] 郭新宇,赵春江,刘洋,等.基于生长模型的玉米三维可视化研究[J].农业工程学报,2007,23(3):121-125.
Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, Liu Yang, et al. Three-dimensional visualization of maize based on growth models[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 121-125. (in Chinese with English abstract)
- [2] 肖伯祥,郭新宇,王纪华,等.玉米叶片形态建模与网格简化算法研究[J].中国农业科学,2007,40(4):693-697.
Xiao Boxiang, Guo Xinyu, Wang Jihua, et al. Maize leaf morphological modeling and mesh simplification of surface[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4): 693-697. (in Chinese with English abstract)
- [3] Christian Fournier, Bruno Andrieu. ADEL-maize: an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy. Application to regulation of morphogenesis by light availability[J]. Agronomie, 1999, 19(3/4): 313-327. DOI: 10.1051/agro:19990311.
- [4] 郭焱,李保国.玉米冠层三维结构研究[J].作物学报,1998,24(6):1106-1109.
Guo Yan, Li Baoguo. Studies on three dimensional structures

- of maize canopy[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(6): 1106—1109. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马蕴韬, 郭焱, 李保国. 应用三维数字化仪对玉米植株叶片方位分布的研究[J]. *作物学报*, 2006, 32(6): 791—798. Ma Yuntao, Guo Yan, Li Baoguo. Azimuthal distribution of maize plant leaves determined by 3D digitizer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(6): 791—798. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态的三维重建[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 141—144. Yang Liang, Guo Xinyu, Lu Shenglian, et al. 3D morphological reconstruction of cucumber leaf based on multiple images[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [7] Quan L, Tan P, Zeng G, et al. Image-based plant modeling[J]. *ACM Trans on Graphics (SIGGRAPH)*, 2006, 25(3): 772—778.
- [8] 吕朝辉, 陈晓光, 郑元杰, 等. 立体视觉技术在秧苗直立度测定中的应用[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(4): 127—130. Lü Chaohui, Chen Xiaoguang, Zheng Yuanjie, et al. Application of three dimensional vision technique in measuring seedling perpendicularity[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(4): 127—130. (in Chinese with English abstract)
- [9] Kise M, Q Zhang, F Rovira Más. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(4): 357—367.
- [10] Rovira Más F, Zhang Q, Reid J F. Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereo images[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(3): 251—259.
- [11] He D X, Matsuura Y, Kozai T, et al. A binocular stereovision system for transplant growth variables analysis[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 19(5): 611—617.
- [12] Wu J, Tillet R, McFarlane N, et al. Extracting the three dimensional shape of live pigs using stereo photogrammetry [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2003, 44(3): 203—222.
- [13] Tsai R. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]//In: *Proc IEEE Conference on CVPR'86*, Miami Beach, Florida, 1986: 364—374.
- [14] Weng J Y, Cohen P, Hemmiou M. Camera calibration with distortion model and accuracy evaluation[J]. *IEEE-PAMI* 14, 1992, (10): 965—980.
- [15] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330—1334.
- [16] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least - squares fitting of two 3-D point sets[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(5): 698—700.
- [17] Goryn Daniel, Hein Soren. On the estimation of rigid body rotation from noisy data[J]. *IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(12): 1219—1220.
- [18] Eggert D W, Lorusso A, Fisher R B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms [J]. *Machine Vision and Application*, 1997, 9(5): 272—290.

Three-dimensional reconstruction of maize leaves based on binocular stereovision system

Wang Chuanyu¹, Zhao Ming^{2*}, Yan Jianhe¹, Zhou Shunli¹, Zhang Yinghua¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 3D structure of maize leaves is an important indicator for evaluating biological characteristics. In order to generate 3D structure of maize leaves rapidly, simply, and accurately, the authors proposed a 3D reconstruction system mainly consisting of two high resolution cameras. The chessboard was chosen to be the plane calibrating template mark, and structured light was applied in stereo matching process to calculate 3D point position. After interpolating leaf 3D points with Cardinal spline and triangulating them into surfaces, a part of leaf 3D structure could be acquired, and then translating and rotating the different parts of maize leaf to form the final complete structure. Experimental results of 3D reconstruction of maize leaves show that this method has the advantage not only of high precision but also of non-contact, non-destructive, and automatic operating process.

Key words: maize leaves, machine vision, 3D reconstruction, 3D registration