

基于单目视觉和激光扫描技术的油菜植株模型重建及株型参数测量

史蒲娟¹ 翟瑞芳² 常婷婷³ 彭 辉² 林承达¹ 罗 俊²

1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070;

2. 华中农业大学信息学院, 武汉 430070; 3. 武汉光庭信息技术有限公司, 武汉 430070

摘要 分别采用单目视觉和激光扫描技术对2个油菜品种中双6号和华油杂62号的植株进行三维重建, 并在重建模型上完成了对株高、叶柄长、叶片长度和叶片面积等4个株型参数的测量。结果表明: 使用单目视觉和激光扫描技术的重建结果均能真实地表现油菜植株的整体形态, 叶片间无遮挡的中双6号油菜植株效果更好, 测量误差在2.00%以内; 形态复杂叶片间部分遮挡的华油杂62号油菜植株测量误差在3.00%以内。模型重建试验表明, 利用单目视觉和激光扫描技术能够完成复杂植株的模型重建, 并实现部分株型参数的测量, 可以为作物的遗传育种提供数据支持。

关键词 油菜; 株型参数; 单目视觉; 激光扫描; 三维重建; 无损测量

中图分类号 S 565; TP 391.41 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)03-0063-06

作物育种表型分析中, 株型参数的获取一直是作物研究中的热点^[1]。传统的作物株型参数测量方法大都依靠人工完成, 耗时费力, 具有破坏性, 且不适用于大批量株型参数的获取^[2]。因此, 无损、高通量的作物株型参数研究已成为国内外研究热点。Tackenberg^[3]利用图像处理技术, 实现了黑雀麦植株垂直生物量分布以及干物质含量的无损测量。Ma等^[4]利用HSV颜色空间等模型实现了玉米果穗体积的测量。Yang等^[5]利用X射线断层扫描技术实现了分蘖期水稻参数的高通量测量。Lee等^[6]使用激光扫描技术实现了柑橘树冠高度、宽度等几何参数的量化。方伟等^[7]利用可见光成像技术完成了单株水稻植株地上部分生物量的无损预测。王菲等^[8]利用三维数字仪构建了苹果树的三维模型, 并研究了三维模型和叶面积指数、果实产量之间的相关性。目前, 对油菜作物模型重建及株型参数测量的系统性研究成果报道较少^[9]。本研究以中双6号和华油杂62号油菜植株为研究对象, 通过单目视觉和激光扫描^[10-11] 2种技术对油菜植株进行三维重建, 分别实现株高、叶柄长、叶片长以及叶片面积等4个株型参数的在体测量, 并与参考值进行比较, 实

现了油菜株型参数的无损在体测量, 从而可以更好为后期的生长培育、产量预估以及遗传育种提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

中双6号和华油杂62号油菜植株种植方式为单株盆栽种植, 生长期为七叶期。单目视觉技术数据采集设备为苹果公司生产的iPhone5S手机, 激光扫描技术数据采集设备为Creamform公司生产的HandyScan3D激光扫描仪。

1.2 基于单目视觉技术的油菜植株三维重建

使用普通手机为图像采集设备, 围绕油菜植株从不同角度和高度获取RGB图像, 通过识别各幅图像的关键特征点, 进行两两匹配, 获取稀疏三维点云, 再利用MVS(multiple view stereo)技术生成稠密点云, 完成目标对象的三维重建。

鉴于SIFT(scale-invariant feature transform)算法^[12]在尺度缩放、旋转以及亮度等方面均具有不变性, 在噪声、视角变化等方面也较为稳定^[13]。本研究采用该算法完成局部特征点的提取^[14], 主要包

括以下步骤:①尺度空间构造:利用原始图像和高斯函数构造尺度空间,即高斯差分金字塔,以检测那些对于尺度和旋转性不变的潜在兴趣点;②关键点搜索与定位:以上一步得到的高斯差分金字塔图像为依据,在此基础上进行关键点的搜寻与定位,即局部极值点;③方向赋值:根据图像局部的梯度方向值,为每个极值点进行赋值;④关键点描述:用矩阵形式的描述子对赋予主方向后的关键点进行描述,其中,描述子包括极值点和该极值点邻域有用的像素点。

SFM(structure from motion)技术^[15-16]是通过从多幅不同角度的油菜植株图像中检测匹配二维特征点,然后利用投影公式计算每幅图像的相机参数和二维匹配点对应的三维信息,从而获取油菜植株的稀疏三维点云。投影公式如式(1)所示:

$$x = K[R|t]X \quad (1)$$

其中, K 为相机的内参数; R 为相机的旋转矩阵; t 为平移向量; x 为二维图像中的像素点; X 为 x 对应的三维点坐标。

采用基于小面片的方法 PMVS (patch-based multi-view stereo)^[17] 获取稠密三维点云,利用相似性以种子面片为基础进行扩散,重建出种子面片周围的面片;最后,对实际不存在的面片和不正确的面片进行滤波,获取精确的重建结果。

1.3 基于激光扫描技术的油菜植株三维重建

首先在油菜植株及周围设置标记点,然后手持3D激光扫描仪围绕植株从各个视点进行扫描,获取各视点的三维点云数据,并完成不同视点点云数据的配准;最后完成杂点删除、三角网格化以及孔洞修复等工作。点云数据的配准是模型重建中最关键和最基础的操作。激光扫描仪单次扫描时只能获取当前视点的点云数据,为获取目标对象的完整三维点云数据,须从多个不同视点对目标物进行扫描。利用标记点建立不同视点点云间的对应关系,实现对多视点点云的自动配准^[18]。配准后的点云数据是一系列不规则的离散点,需构建三角网模型完成植株表面重建。三角网模型即用彼此不相交的直线段连接给定平面中的 N 个点,以致凸包内的每个区域即为一个三角形。本研究采用的 Delaunay 三角网网格化算法^[19-20]能使产生的三角形多为类似等边三角形的锐角三角形,避免出现细长或者尖锐的三角形。

1.4 株型参数测量方法

1)株高、叶片长和叶柄长。株高、叶片长度以及叶柄长度标准参考值的测量使用直尺和软绳完成。

例如:测量叶片长度时,用软绳贴合叶片表面长轴两端,所得软绳长度即为叶片长度。三维模型中,株高和叶柄长的测量可直接计算对应直线段两端点间的距离,设对应直线段两端点坐标分别为 $M(x_M, y_M, z_M)$ 和 $N(x_N, y_N, z_N)$,则其计算公式如下:

$$l = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2 + (z_M - z_N)^2} \quad (2)$$

由于叶片表面存在一定的弯曲度,在三维空间测量叶片长度时,本研究根据三角形两边之和大于第三边的原理提出了一种逐渐缩短步长的方法。如图 1 所示,设叶片长轴的 2 个端点坐标分别为 $A(x_A, y_A, z_A)$ 和 $B(x_B, y_B, z_B)$,则具体步骤:①设叶片初始长度值 $l=0$;②计算两端点 A 、 B 之间的直线距离 l_{AB} ;③取 A 、 B 两端点间第 3 个点 C ,令 $x=(x_A+x_B)/2, y=(y_A+y_B)/2$,根据 $(x_C=x, y_C=y)$ 搜索叶片上最接近的点 $C(x_C, y_C, z_C)$;④分别计算 AC 、 CB 两子段间的距离 l_{AC}, l_{CB} ,并令 $l'_{AB}=l_{AC}+l_{CB}$,比较 l_{AB} 和 l'_{AB} ;⑤若 $|l_{AB}-l'_{AB}|<\epsilon$,将 l_{AB} 累加到叶片长度 l 中,更新 $l=\epsilon+l_{AB}$;⑥否则,对 AC 、 CB 段分别处理。对 AC 段,用端点编号 B 替换端点编号 C ,直线段编号更新为 AB ,重复步骤②~⑥;对 CB 段,用端点编号 A 替换端点编号 C ,直线段编号更新为 AB ,重复步骤②~⑥。⑦输出 l 。该算法将一直迭代直到满足误差条件终止,输出叶片长度值。当叶片极其平整时,叶片长度直接等于 A 、 B 两端点的距离,否则最终叶片长度等于各子段长度之和。

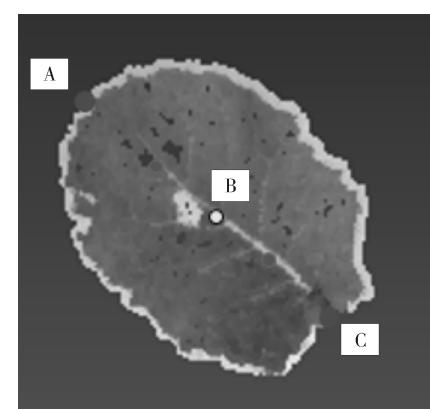


图 1 三维空间上叶片长的测量原理图

Fig.1 Leaf length measurement in 3D space

2)叶片面积。借助图像处理的方法实现叶片面积在体无损测量。具体操作步骤如下:以白纸为背景,在叶片旁边放置直尺作为参照物,获取叶片的二维图像。首先,根据参照物尺寸,计算像素和物理单

位的换算关系 Q (像素/面积);然后,完成叶片和背景的分割,统计叶片的像素总数 sum,由公式(3)求得叶片面积 S :

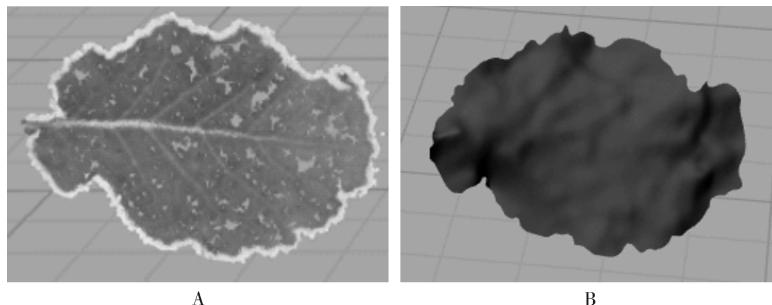
$$S = \text{sum}/Q \quad (3)$$

三维模型中叶片面积的测量相对复杂,需先对油菜叶片进行曲面拟合,曲面面积即为所求叶片面积。本研究采用 NURBS(non uniform rational B-spline)曲面拟合方法来完成,该方法可以重建出叶

片的真实曲面,其中某叶片拟合结果如图 2 所示,公式(4)为所用拟合公式:

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,1}(v) V_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,1}(v) V_{i,j}} \quad (4)$$

其中, u 和 v 表示在参数平面上的坐标变量, $B_{i,k}(u)$ 和 $B_{j,1}(v)$ 依次为 u 、 v 方向的 B 样条基函数; $V_{i,j}$ 表示权因子; $P_{i,j}$ 表示曲面的控制顶点。



A: 三维点云 3D point cloud; B: NURBS 拟合结果 NURBS fitting result.

图 2 叶片三维点云拟合结果

Fig.2 Leaf fitting result of 3D point cloud

2 结果与分析

2.1 单目视觉重建结果

本试验使用的图像采集设备为 iPhone5S, 摄影时保持油菜植株位置不动, 围绕其旋转拍摄以获取植株不同角度的 RGB 图像。在保证能够拍摄到完整油菜植株的原则下尽可能距离植株相对较近。通过前期尝试性试验发现, 复杂作物的模型重建常需采集较多图像, 结构简单的作物图像数量可相对较少, 如图 3A、B 所示, 华油杂 62 号植株图像数目为 270 幅, 中双 6 号植株为 169 幅。利用 VisualSfM 软件分别读入 2 组数据, 再利用 SIFT 和 SFM 算法获取植株三维稀疏点云, 结果如图 3 C、D 所示, 标注框内是某一叶片点云数据。

油菜植株的稀疏三维点云可以基本恢复油菜的形态结构, 但缺失细节信息。利用 PMVS 技术进行种子面片扩散和滤波, 生成油菜植株的稠密三维点云数据。最后利用 Meshlab 软件完成杂点删除及显示, 最终结果如图 3 E、G 所示, 2 组结果中图 3F、H 分别为图 3E、G 标注框内叶片点云的局部放大示意图。观察图 3E、G 可以发现, 单目视觉技术可完成 2 种油菜植株三维重建工作, 并可显示出油菜植株整体的形态。其中, 中双 6 号植株因形态结构

相对简单, 重建效果更优。但重建结果中均含有噪声, 叶片表面细节信息存在较小缺失, 边缘细节表现较差。

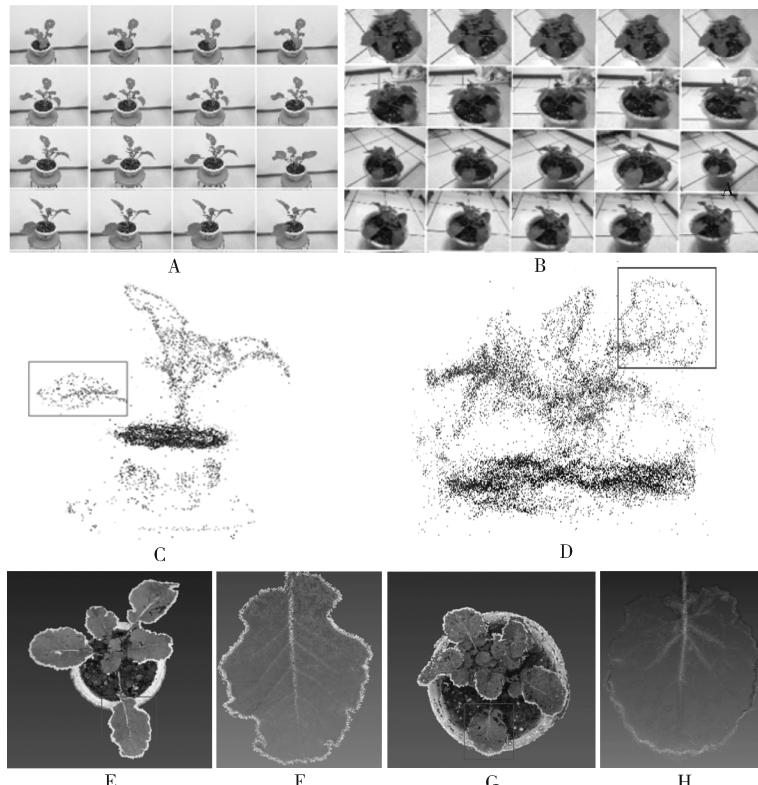
2.2 激光扫描重建结果

使用激光扫描仪采集油菜植株原始三维激光点云数据, 其结果不仅包含油菜植株, 且含有背景等冗余信息, 利用 Geomagic Studio 软件删除除植株外的噪声点, 并完成孔洞修复工作, 最终结果如图 4 所示。由图 4 可知, 无论生长形态较为简单的中双 6 号植株还是形态复杂的华油杂 62 号植株基于激光扫描技术的重建结果与真实油菜植株相比基本一致, 细节完整, 叶片边缘清晰, 噪声相对较少。

2.3 株型参数测量结果

试验中将手工测量得到的株高、叶柄长、叶片长度值以及在二维图像测量的叶片面积值作为参考值(reference, RE)。株高、叶柄长以及叶片长单位为 cm, 叶片面积单位为 cm²。两种模型的测量结果与参考值对比情况如表 1 所示。

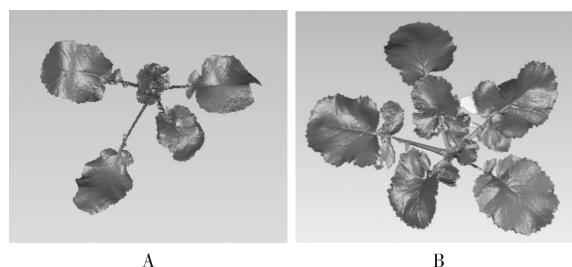
由表 1 可知, 对于华油杂 62 号植株而言, 基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的株高较参考值的相对误差分别为 0.44% 和 0.36%; 基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的叶柄长度相较参考值的相对误差精度均在 2.00% 内, 平均相对误差分别为



A,C,E:中双6号植株 Plant of Zhongshuang 6; C,D,G:华油杂62号植株 Plant of Huayouza 62; A,B:RGB图像 RGB images; C,D:稀疏点云 Sparse point cloud; E,G:稠密点云 Dense point cloud; F,H:E,F的局部放大图 Local amplification of E and F.

图3 2个品种油菜植株的三维点云获取过程

Fig.3 3D point cloud acquirement process of Zhongshuang 6 and Huayouza 62



A:中双6号植株 Zhongshuang 6; B:华油杂62号植株 Huayouza 62.

图4 2个品种油菜植株重建结果

Fig.4 Generated 3D models of Zhongshuang 6 and Huayouza 62

1.09%和0.90%;基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的叶片长度相较参考值,相对误差精度分别在3.00%和2.00%以内,平均相对误差分别为1.92%和0.94%;由于生长形态复杂,叶片表面不平整、弯曲程度大,导致测量的叶片面积误差相对较大,相较参考值相对误差精度分别在5.00%和4.00%以内,平均相对误差分别为2.74%和2.17%。

对于中双6号油菜植株而言,基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的株高和参考值比较,相对

误差分别为0.79%和0.91%;基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的叶柄长度和参考值比较,相对误差精度均在2.00%以内,平均相对误差分别为1.12%和1.20%;基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的叶片长度和参考值比较,相对误差精度均在2.00%内,平均相对误差分别为1.30%和1.06%;基于单目视觉和激光扫描重建模型测量的叶片面积相较参考值,相对误差精度分别在3.00%和2.00%以内,平均误差分别为1.59%和1.25%。

表1 2个品种油菜植株株型参数测量结果

Table 1 Measurement results of phenotypic parameters of Huayouza 62 and Zhongshuang 6

株型参数 Phenotypic parameters	参考值 Reference value	单目视觉 Monocular vision	激光扫描 Laser scanning	MV与RV		LS与RV	
				相对误差/% RE	平均相对误差/% ARE	相对误差/% RE	平均相对误差/% ARE
华油杂 62号植株 Huayouza 62	高度/cm Height	13.79	13.73	0.44		0.36	
	叶柄长度/cm Petiole length	1 7.87	7.83	0.64		1.40	
		2 8.46	8.56	1.18	1.09	0.83	0.90
		3 6.21	6.30	1.45		0.48	
	叶片长度/cm Leaf length	1 13.55	13.34	1.55		0.43	
		2 14.84	14.56	1.89	1.92	1.15	0.94
		3 13.93	13.08	2.32		1.25	
	叶面积/cm ² Leaf area	1 163.03	169.76	4.13		1.51	
		2 150.91	154.77	2.56	2.74	3.58	2.17
		3 103.46	101.87	1.54		1.41	
中双 6号植株 Zhong shuang 6	高度/cm Height	16.50	16.37	0.79		0.91	
	叶柄长度/cm Petiole length	1 13.50	13.59	0.67		1.56	
		2 14.00	14.17	1.20	1.12	0.93	1.20
		3 10.80	10.64	1.50		1.11	
	叶片长度/cm Leaf length	1 12.00	11.90	0.83		0.67	
		2 13.10	13.36	1.98	1.30	0.92	1.06
		3 8.20	8.11	8.33	1.10	1.59	
	叶面积/cm ² Leaf area	1 84.32	85.38	83.02	1.20	1.54	
		2 110.56	111.98	111.03	1.28	1.59	0.48
		3 66.87	68.41	65.72	2.30	1.72	

注:RV、MV 和 LS 分别代表参考值、单目视觉和激光扫描 Note: RV, MV and LS respectively representing reference value, monocular vision and laser scanning. RE: Relative error; ARE: Average relative error.

3 讨论

本研究以生长形态不同的中双6号和华油杂62号油菜植株为研究对象,分别研究了基于单目视觉和激光扫描技术的油菜植株三维重建,并在重建模型上完成了对株高、叶柄长、叶片长以及叶片面积等4个株型参数的测量,最后将测量结果与参考值进行定性定量的评价。试验结果表明:对于生长形态不同的2种植株,2种方法均实现了植株三维形态的重建,重建模型真实地反映了油菜植株的整体形态。生长形态较简单的中双6号植株,2种方法的株型参数测量精度较接近;生长形态较复杂的华油杂62号植株,激光扫描重建模型的参数测量精度明显优于单目视觉重建模型;单目视觉技术重建结果噪声较多,在叶片表面及边缘细节等方面表现较差,而激光扫描技术则避免了此类问题。由于叶片表面不平整,存在弯曲或褶皱情况,导致叶片面积测量误差相对较大,叶片稍复杂的华油杂62号植株更甚。因此,使用单目视觉和激光扫描技术重建油菜植株模型,并实现部分株型参数测量的方法是可行有效的,与参考值相比,误差较小,可以满足农业的

实际需求,同时也实现了油菜植株部分株型参数的无损在体测量。实际操作中,作物重建方法的选择可依据具体情况而定:若作物生长形态较简单,可以选择单目视觉技术进行重建。若生长形态复杂,但对重建精度要求较低,该方法亦可以实现重建效果;但若对精度要求较高,则应选择激光扫描技术完成油菜株型重建工作。后续研究中,将进一步对算法的实现效率进行改进,以期实现油菜作物株型参数的高通量在体测量,为作物的遗传育种提供可靠的数据支持。

参 考 文 献

- [1] PIERUSCHKA R, POORTER H. Phenotyping plants: genes, phenes and machines[J]. Functional plant biology, 2013, 39(11):813-820.
- [2] 赵春江.对我国未来精准农业发展的思考[J].农业网络信息, 2010(4):5-8.
- [3] TACKENBERG O. A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rate, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis[J]. Annals of botany, 2007, 99(4):778-783.
- [4] MA Q, JIANG J T, ZHU D H, et al. Rapid measurement for 3D

- geometric features of maize ear based on imageprocessing[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural enginering, 2012,28(2):208-212.
- [5] YANG W N, XU X C, DUANL F, et al. High-throughput measurement of rice tillers using a conveyor equipped with X-ray computed tomography [J]. Review of scientific instruments, 2011,82(2):251021-251027.
- [6] LEE K H, EHSANI R. Comparison of two 2D laser scanners for sensing objectdistances, shapes, and surface patterns[J]. Computers and electronics in agriculture, 2008,60(2):250-262.
- [7] 方伟,冯慧,杨万能,等.基于可见光成像的单株水稻植株地上部分生物量无损预测方法研究[J].中国农业科技导报,2015,17(3):63-69.
- [8] 王菲,张社奇,李丙智,等.高纺锤形苹果树三维重建和光照特性评价[J].北方园艺,2012(6):10-13.
- [9] 刘刚,司永胜,冯娟.农林作物三维重建方法研究进展[J].农业机械学报,2014,45(6):38-46.
- [10] 张勤,贾庆轩.基于激光与单目视觉的室内场景三维重建[J].系统仿真学报,2014,26(2):357-362.
- [11] MICHAEL P, ANDREW P F, ERIK H M, et al. Surface reconstruction of plant shoots from multiple views[J]. Computer vision, 2015,8928:158-173.
- [12] 明安龙,马华东.多摄像机之间基于区域 SIFT 描述子的目标匹配[J].计算机学报,2008,31(4):650-660.
- [13] DAVID G L. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. International journal of computer vision, 2004,60(2):91-110.
- [14] 于丽莉,戴青.一种改进的 SIFT 特征匹配算法[J].计算机工程, 2011,37(2):210-212.
- [15] 庭旺,王庆.一种基于 SFM 重建点云的三角网格化算法[J].计算机应用研究,2011,28(2):794-796.
- [16] 王琨,郑南宁.基于 SFM 算法的三维人脸模型重建[J].计算机学报,2005,28(6):1048-1052.
- [17] KANGPING F, SHENHAN S, ZHANYI H. Line matching across views based on multiple view stereo[J]. Acta automatica sinica, 2014,40(8):1680-1689.
- [18] 官云兰,程效军,张明,等.三维激光扫描数据配准方法[J].工程勘测,2008(1):53-57.
- [19] 袁方,唐杰,武港山.一种基于三维 Delaunay 三角化的曲面重建算法[J].计算机技术与发展,2011,21(10):14-18.
- [20] 巩根熙,何诚,冯仲科,等.基于改进 Delaunay 算法的树冠三维重构单木因子提取[J].农业机械学报,2013,44(2):192-198.

3D model generation and phenotypic measurement of rapeseed plant based on monocular visio and laser scanning technology

SHI Pujuan¹ ZHAI Ruifang² CHANG Tingting³ PENG Hui² LIN Chengda¹ LUO Jun²

1. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Informatics, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Guangting Informatics Co., Ltd, Wuhan 430070, China

Abstract The traditional phenotypic parameter measurement of rapeseed plant is often completed in manual way, which is time-consuming and destructive. Two rapeseed cultivars with different growth form including Zhongshuang 6 and Huayouza 62 were used to be measured with the monocular vision and laser scanning technology. 3D models of the rapeseed plants were generated. Four phenotypic parameters were measured based on the 3D models generated. The results showed that it was actually demonstrated the holistic morphological characteristics of plant from the reconstructed results with different methods. The cultivar Zhongshuang 6 is relatively simple and much better. Compared with the reference value, the average errors of phenotypic parameter measure in the reconstruction model were within 2.00%. The cultivar Huayouza 62 is more intricate with the average errors of within 3.00%. It was concluded that the results of the phenotypic parameter measurements under the two reconstruction methods errors were minor compared with the reference value, which can meet the practical requirements of agricultural production. It will provide data support for practical production.

Keywords rapeseed; phenotypic parameters; monocular vision; laser scanning; 3D reconstruction; nondestructive measurement

(责任编辑:陆文昌)