

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.035

玉米器官三维模板资源库构建

温维亮^{1,2} 郭新宇^{2,3} 卢宪菊^{2,3} 王勇健^{2,3} 赵德达^{2,3} 廖维华^{2,3}

(1.北京工业大学计算机学院,北京100124;2.北京农业信息技术研究中心,北京100097;

3.数字植物北京重点实验室,北京100097)

摘要:玉米器官三维模板资源库的构建能够为数字玉米技术体系的建立提供信息完整、具有高真实感的玉米器官三维模型。首先,对玉米植株进行结构单元划分,然后,通过分析玉米各器官的形态结构特征,从三维数据获取方式的角度制定玉米主要器官三维数据获取规范,按该规范开展玉米主要器官三维数据获取工作,并基于所获取的实测数据进行器官几何模型构建,最后,以所构建的玉米器官几何模型为内容,以品种、器官和生育时期等作为关键字构建玉米器官三维模板资源库。资源库包含了具有农学参数的多品种、多生育时期玉米器官几何模型,其构建将有利于数字玉米在玉米行业的各方面发挥作用,也为其他植物的三维模板资源库构建提供了参考。

关键词:玉米器官;三维;资源库;数据采集

中图分类号:S126 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2016)08-0266-07

Three-dimensional Template Resource Library Construction of Maize Organs

Wen Weiliang^{1,2} Guo Xinyu^{2,3} Lu Xianju^{2,3} Wang Yongjian^{2,3} Zhao Deda^{2,3} Liao Weihua^{2,3}

(1. College of Computer Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. Beijing Key Laboratory of Digital Plant, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to provide three dimensional (3D) models with complete agronomic information and high fidelity for the construction of digital maize system, a 3D template resource library of maize organs was constructed. Firstly, maize plants were subdivided into basic structural units, including nodal root, lateral root, mesocotyl, stems, sheath, leaf, tassel and ear. Secondly, the data acquisition standard of major maize organs was established from the perspective of 3D data acquisition by analyzing the morphological and structural features of the organs. 3D data of the maize organs were acquired by using 3D scanners and 3D digitizers according to the standard, and geometric models of the maize organs were constructed on the basis of the measured 3D data. Finally, the 3D template resource library of maize organs was constructed by assembling these geometric models. The library took cultivar, organ name, growth period etc. as its key words for resource retrieval. It contained a large number of maize organ models of different cultivars and multiple growth periods with consistent agronomic parameters. The construction of the library would promote the digital maize system and played a great role in the research, production, promotion and demonstration of maize industry, it also provided a reference for the 3D resource library construction of other plants.

Key words: maize organ; three dimensions; resource library; data acquisition

收稿日期:2015-12-03 修回日期:2016-01-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA101906)、国家自然科学基金项目(31171454)和北京市科技计划项目(D151100004215004)

作者简介:温维亮(1983—),男,博士生,北京农业信息技术研究中心助理研究员,主要从事数字植物研究,E-mail:wenwl@nrcita.org.cn

通信作者:郭新宇(1973—),男,研究员,主要从事数字植物理论体系研究,E-mail:guoxy@nrcita.org.cn

引言

玉米是全球第一大作物,我国三大主要粮食作物之一,具有重要的粮用与经济价值。在我国逐步推进“农业现代化”建设和“互联网+”战略的背景下,采用数字化、可视化的方式^[1-2]构建玉米器官三维模板资源库,对推动玉米功能-结构模型^[3-4]的定量化和可视化研究、玉米生产过程高新技术的推广和示范具有重要作用,也可为玉米行业与互联网的融合提供数字媒体资源。

在三维资源库构建方面,其他领域已分别在三维人体及人脸数据库^[5-8]、三维零件库^[9]、数字矿山数据库^[10]等方面开展了大量工作。而在植物3D可视资源库建设与集成应用方面,研究者基于Xfrog^[11-12]植物几何建模软件构建了XfrogPlant植物几何模型库,该模型库主要面向游戏、娱乐与其他商用领域,所构建的植物几何模型为物种级,依靠建模者对植物的观察与理解通过调控模型参数生成,无法反映真实植物的生长状态,难以区分模型的品种、生长时期、栽培环境等农业生产要素,因此无法在农业生产及科研方面应用。国内外已在玉米器官几何建模方面开展了相关研究^[13-16],积累了大量玉米三维可视资源,为玉米器官三维模板资源库的构建提供了丰富的素材;但同时,这些资源的获取与构建没有一致的标准规范,致使这些玉米器官三维模型配套信息不完整,难以整合、管理、共享与传播。本文依托已有的互联网+应用平台,整合现有植物三维数据获取仪器与三维重建等手段^[17-21],通过制定玉米三维数据获取技术规范,构建玉米器官三维模板资源库。

1 玉米器官三维模板资源库构建方法

玉米器官三维模板,即高质量玉米器官三维模型,由于其在数字玉米体系框架中被用于器官三维展示或植株三维模型组装的基本单元,故被称之为三维模板。玉米器官三维模板资源库的构建流程包括5部分:

(1)玉米结构单元划分。器官是植株的基本组成单位,为了使玉米植株解析表达成为基本结构单元的组合,需对玉米植株进行基本结构单元的划分。按照玉米形态结构及功能将玉米植株器官划分为3大类:根系类器官结构单元,包括节根、侧根和中胚轴;节单位类器官结构单元,包括节间、叶鞘和叶片;生殖类器官包括雄穗和雌穗。

(2)玉米器官三维数据获取规范制定。为了保证所构建资源库中三维模板规格的一致性,需制定

器官三维数据获取规范,使得资源库中的三维模板均为在该三维数据获取规范约束下所获取三维数据的基础上构建。按数据获取方式,数据获取规范包含三维数字化数据获取规范、三维扫描数据获取规范、表观纹理数据获取规范和辅助信息采集规范4部分。

(3)玉米器官三维数据采集。按照玉米器官三维数据获取规范,分别获取各结构单元的三维数据及表观纹理和辅助信息。其中,采用三维扫描仪获取节间、叶鞘、叶片、雌穗和中胚轴的三维点云数据;采用三维数字化仪获取节根、侧根和雄穗的三维数字化数据;采用高清数码相机获取叶片表观纹理数据;在获取以上数据的同时,记录目标器官所在植株的品种、密度、生育期、器官序号、经纬度和水肥处理等辅助信息,以保证数据的完整性。

(4)基于实测数据的器官三维模板构建。具体包含2部分:利用所获取的三维数字化数据,结合植物参数化几何建模方法构建节根、侧根和雄穗的三维模板;基于三维点云的几何建模方法构建节间、叶鞘、叶片、雄穗和中胚轴的三维模板。

(5)三维模板资源库构建。在所构建的各玉米器官几何模板的基础上,构建玉米器官三维模板资源库。资源库具体包括资源编码、品种名称、器官名称、生育时期、种植密度、水肥处理、经纬度等索引信息。资源库构建方法流程如图1所示。

2 玉米三维数据获取规范制定

2.1 规范制定的必要性

基于实测形态结构数据所重建的玉米器官三维模型,具有真实感强、可反映玉米品种间形态差异和因环境胁迫或栽培因素导致品种内的形态差异等特点。因此,开展玉米三维数据获取工作,对于高效地构建品种丰富、功能完善的玉米器官三维模板资源库具有重要作用。然而,三维数据采集技术是一种新兴技术^[22],目前缺乏植物形态结构数据的采集标准规范,我国正耗费大量人力物力,重复采集玉米器官三维数据,这些数据存在可用率低、完整性差等问题,且需大量存储介质对数据予以存储,难以实现数据的管理、共享与高效利用。因此,亟需构建玉米三维数据获取规范,约束玉米器官三维数据采集方法,提高玉米器官三维数据的质量与可用性,减少重复低质量的玉米器官三维数据采集工作,进而在提高玉米器官三维模板资源库中模型构建的质量与效率的同时,提高资源库的可扩展性。

2.2 玉米器官三维形态特征分析

为了对玉米各器官开展三维数据获取与规范制

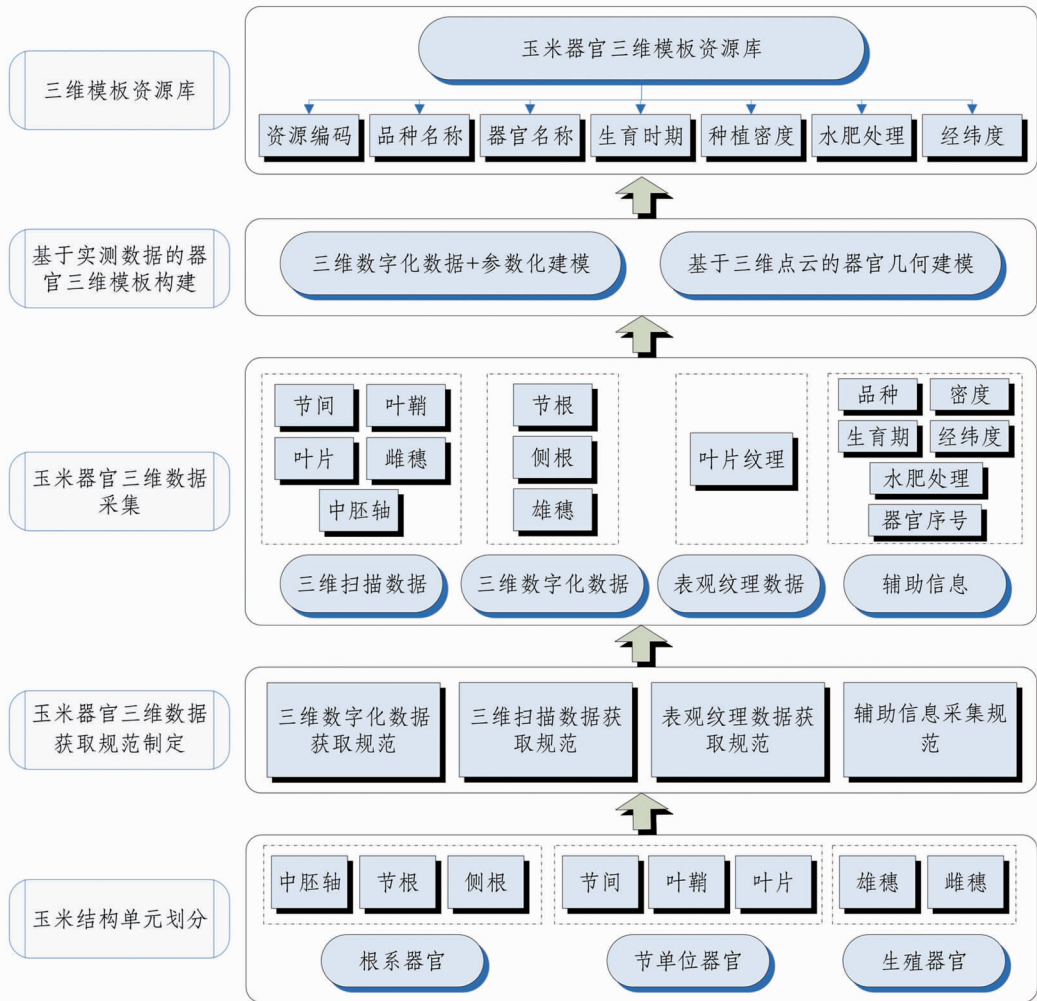


图1 玉米器官三维模板资源库构建流程

Fig. 1 Construction flow chart of three-dimensional template resource library for maize organs

定,对玉米各器官的三维形态特征进行分析。根据玉米器官的形态特征及功能特征,将玉米植株器官划分为3大类:根系类器官、节单位类器官和生殖类器官。

(1)根系类器官:包括节根、侧根和中胚轴。中胚轴为近圆锥形结构,是玉米根系与地上部的连接部分。由于中胚轴上包含着丰富的节根生长细节特征,需采用高精度三维扫描仪获取其三维数据;玉米节根生长于中胚轴上,玉米侧根生长于节根或上级侧根上,节根与侧根为线形结构,其直径较小,无法采用三维扫描仪获取其三维数据,其线形结构适宜采用三维数字化仪获取其骨架的空间分布形态信息。

(2)节单位类器官:玉米主茎由节与节间组成,呈连续生长,每个节的上方着生1片叶,故玉米节间数与叶数相同,因此,将每个节及在当前节生长出的节间、叶鞘和叶片定义为1个节单位,且每个节单位在当前植株有着唯一的标识序号,玉米地上部植株(不包含生殖类器官)可表示为多个节单位的组合。

由于玉米的节与节间在形态上没有明显的划分界限,故节间包含着其上方生长的节,节间为近圆柱形结构;叶鞘为生长在当前节上、包裹着下一级节间上、连接着当前节叶片的器官,其形态也为近圆柱形结构;叶片为生长在叶鞘上的器官,为曲面结构。节间与叶鞘较小,需采用高精度三维扫描仪获取其三维数据,叶片空间伸展性较大,采用常规三维扫描仪获取其三维数据。

(3)生殖类器官:包括雄穗和雌穗。雄穗为线形分枝结构,表面细节丰富,难以用三维扫描仪获取完整的雄穗细节数据,故采用三维数字化仪获取其骨架的三维空间分布数据;雌穗由苞叶和果穗组成,为近圆柱体结构,可采用三维扫描仪获取其三维数据。

2.3 玉米三维数据获取规范

根据玉米各器官的形态结构特征,结合数据获取方式,制定以下4部分三维数据获取规范。具有普适性的标准规范需参考行业标准,而目前植物三维数据获取领域尚未见相关标准,此处所提数据获

取规范是根据玉米器官三维模板资源库对三维数据的可用性和完整性需求,制定的最基本的数据获取规范。

(1) 三维数字化数据获取规范。三维数字化数据用以描述玉米节根、侧根和雄穗等器官的三维空间拓扑结构,可以满足以上玉米器官几何建模的需求。规范要求:确保器官三维数字化数据以分枝结构为基本单位;各基本单位之间具有正确的连接关系;三维数字化数据的完整性,即与实际器官相比不缺少任何分枝结构。

然而,由于玉米根系的特殊性,除幼苗期根系外,目前尚难以获取完整的玉米根系的节根与侧根三维数字化数据,但已有研究表明^[21],采用三维数字化方法获取一定区域内的节根数据是可行的。

(2) 三维扫描数据获取规范。玉米器官三维扫描数据用以精确描述节间、叶鞘、叶片、雌穗和中胚轴等器官的三维形态,可以满足以上玉米器官几何模板建模的需求。规范要求:确保每组三维扫描数据不得存在多于器官表面积 2% 点云区域缺失;无区域性噪点;应用三维扫描数据构建的玉米器官几何模板具有较高的真实感。

(3) 表观纹理数据获取规范。玉米叶片表观纹理数据用于描述玉米叶片细节图像,主要针对玉米叶片,要求可以满足玉米叶片器官几何模板纹理贴图的需求。规范要求:确保纹理贴图在均匀光环境下采集;纹理图像保证器官完整;贴图后的几何模板具有较高的真实感。

(4) 辅助信息采集规范。玉米器官三维数据获取的同时,要求记录数据采集的相关辅助信息以说明栽培因素及种植环境形成的玉米器官形态结构差异性。辅助信息要求包含数据对应的品种、密度、生育期、器官序号、经纬度和水肥处理;同时需要记录数据获取时间、地点、获取仪器名称及获取人员等信息。

3 资源库构建

3.1 数据获取

按照玉米器官三维数据获取规范,分别获取各结构单元的三维数据及表观纹理和辅助信息。采用高精度三维扫描仪 SmartScan - C5 搭载 M - 125 镜头(扫描范围 105 mm × 90 mm, 3D 分辨率为 10 μm),获取玉米节间、叶鞘、籽粒和中胚轴的三维点云数据(为便于拼接,器官上采用不同颜色的记号笔进行标记);采用 Artec Spider 三维扫描仪(3D 分辨率为 0.1 mm)获取玉米雌穗三维点云数据;采用 Artec EVA 三维扫描仪(3D 分辨率为 0.5 mm)获

取玉米叶片三维点云数据;采用 MicroScribe 三维数字化仪获取玉米雄穗点集数据;采用 FastScan 结合 Polhemus Long Ranger 定标系统获取节根及侧根的三维数字化数据;采用高清数码相机获取叶片表观纹理数据;在获取以上数据的同时,记录目标器官所在植株的品种、密度、生育期、器官序号、经纬度和水肥处理等辅助信息,以保证数据的完整性。

3.2 几何建模

基于实测数据的玉米器官三维模板构建主要包含 2 种方法:

(1) 基于三维数字化数据的建模。节根、侧根和雄穗的三维数字化数据为分枝形点集数据,结合植物参数化几何建模方法和球 B 样条等曲面表示方法,即可构建具有真实感的器官几何模型。由于目前玉米节根与侧根的三维数据获取手段仍有待完善,难以开展较为完整的玉米侧根与节根三维数字化数据获取,故本文未给出玉米节根与侧根的三维模型。

(2) 基于三维点云数据的几何建模。基于 3D 点云数据的玉米器官几何模型构建流程一般为:器官采样→三维扫描→点云去噪→生成网格→网格修补→网格平滑,利用该流程即可构建节间、叶鞘、叶片、雄穗和中胚轴的三维模型,其中叶片网格模型由于其平展性易于纹理贴图,应用贴图软件对网格模型进行贴图得到带纹理的叶片几何模板。图 2~4 分别给出了玉米节间、叶鞘和中胚轴的三维模型可视化图像,模型中的红色记号为数据获取过程中为方便点云拼接进行的标记,纹理为扫描数据自带颜色信息。图 5 给出了 4 个玉米品种叶片的三维模型可视化图像。图 6 分别给出了带苞叶和不带苞叶的雌穗三维模型及单籽粒的三维模型可视化结果。



图 2 玉米节间几何模板

Fig. 2 Geometric model of maize internode

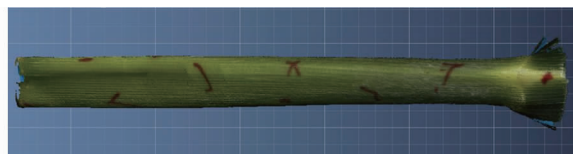


图 3 玉米叶鞘几何模板

Fig. 3 Geometric model of maize leaf sheath

3.3 资源库构建

基于所重建的玉米各器官几何模型,构建玉米器官三维模板资源数据库。数据库中包含器官名称、品种、种植密度、器官序号、生育时期、经纬度、水

肥处理、采集时间、获取仪器等关键字。此外,由于数据库中的各资源都是3D模型,故均带有3D属性信息,各资源配有数据类型(网格、点云等)、数据格式(如stl、obj、ply等)、数据规格(即网格数量)、网格精度和是否有纹理等3D属性。



图 4 玉米中胚轴几何模板

Fig. 4 Geometric model of maize mesocotyl



图 5 不同品种玉米叶片几何模板可视化

Fig. 5 Geometric model visualization of maize leaves of different cultivars

资源ID	资源名称	资源类型	资源数量	评价
Ma001001	玉米中胚轴片	点云数据	2860	评价
Ma011001	玉米先玉335片	首次点云数据	218471	评价
Ma011003	玉米先玉335片	点云数据	48985	评价
Ma011004	玉米先玉335片	点云数据	38210	评价
Ma008002	玉米郑单958的果穗	首次点云数据	139895	评价
Ma008003	玉米郑单958的果穗	首次点云数据	190302	评价
Ma005001	玉米京科968片	点云数据	45470	评价
Ma002002	玉米京科968片	点云数据	40220	评价
Ma005001	玉米农大108片	点云数据	50040	评价

图 7 玉米器官三维模板资源库界面

Fig. 7 Interface of 3D template resource library of maize organs

主产区新品种华农 1107 和原玉 10 玉米为目标植株,按玉米三维数据获取规范获取目标植株各叶片、雄穗及雌穗的三维形态数据并构建各器官三维几何模型添加到玉米器官三维模板资源库中,同时测量目标植株各叶片的着生高度、叶方位角、雄穗高度和雌穗着生高度等株型参数,结合植物参数化几何建模方法^[23]构建植株几何模型。图 8 给出了所构建的华农 1107 和原玉 10 玉米品种的植株三维可视化几何模型。玉米植株几何模型在新品种推广示范中

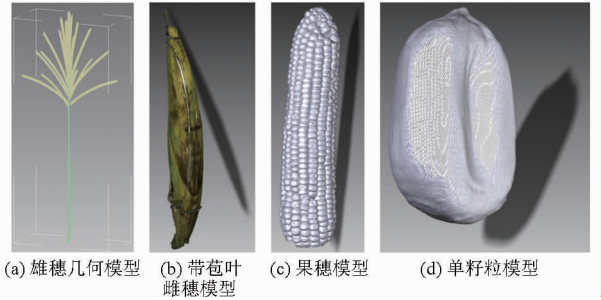


图 6 玉米中胚轴几何模板

Fig. 6 Geometric model of maize reproductive organs

玉米器官三维模板资源库是一个开放的、动态的、可视的、交互的平台,用户需严格按照玉米三维数据获取规范进行玉米数据采集,并基于所获取的实测数据重建三维模型并提交,平台管理员通过审核后对网格精度进行评定并决定是否准许该资源进入到数据库中。与其他领域 3D 模型库类似,采用基于 Web 的数据库调用实现三维模型的远程访问与交互浏览。此外,为了提供更为直观的配套数据,资源库还需配有模型对应的真实图片与动画信息,为数据处理者与使用者提供更为直观的模式辅助信息。图 7 为玉米器官三维模板资源库的界面视图。

3.4 资源库应用实例

为说明玉米器官三维模板资源库构建方法的可行性和有效性,以玉米新品种推广示范应用中的玉米植株模型构建与展示为例进行说明。以东北玉米



可全方位、立体展示新品种的各方面细节特征与株型指标。资源库的构建在上述植株几何模型构建中发挥了规范三维数据获取和提高植株几何模型构建效率的作用,并为用户进一步了解新品种的农学参数特征、资源的分享和重用提供了一个开放的、动态的、可视的、交互的平台。

4 结论

(1) 提出了一种玉米器官三维模板资源库构建

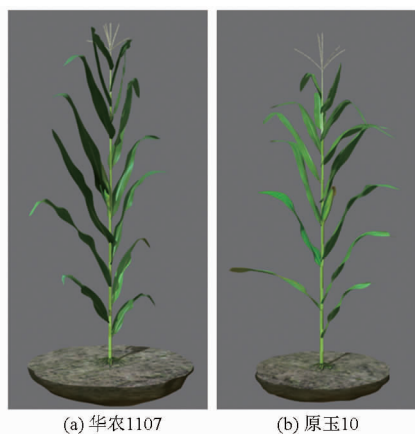


图 8 利用玉米器官三维模板资源库模板所构建的玉米植株几何模型

Fig. 8 Geometric models of maize plants constructed using resources in 3D template resource library of maize organs

方法流程,通过制定玉米器官三维数据获取规范约束玉米器官三维数据获取的完整性与准确性,基于所获取的实测数据构建高真实感的玉米各器官三维模型,在此基础上初步构建玉米器官三维模板资源库。

(2)玉米器官三维模板资源库为当前以植物参数化方法为主的几何建模提供了更多的可用资源,使得以植株形态参数为驱动的“组装式”植物几何建模方式更为丰富和便捷,所构建植株几何模型的真实感更强。

(3)玉米器官三维模板资源库提供了一个带有完整农学信息和三维形态特征的多品种、多生育时期玉米器官三维模型的管理、共享和传播平台。

参 考 文 献

- 1 赵春江,陆声链,郭新宇,等. 数字植物研究进展:植物形态结构三维数字化[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3415 - 3428.
ZHAO Chunjiang, LU Shenglian, GUO Xinyu, et al. Advances in research of digital plant: 3D digitization of plant morphological structure[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3415 - 3428. (in Chinese)
- 2 赵春江,陆声链,郭新宇,等. 数字植物及其技术体系探讨[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2023 - 2030.
ZHAO Chunjiang, LU Shenglian, GUO Xinyu, et al. Exploration of digital plant and its technology system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2023 - 2030. (in Chinese)
- 3 VOS J, EVERS J B, BUCK-SORLIN G H, et al. Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(8): 2101 - 2115.
- 4 GUO Y, FOURCAUD T, JAEGER M, et al. Plant growth and architectural modelling and its applications[J]. Annals of Botany, 2011, 107(5): 723 - 727.
- 5 尹宝才,孙艳丰,王成章,等. BJUT-3D 三维人脸数据库及其处理技术[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(6): 1009 - 1018.
YIN Baocai, SUN Yanfeng, WANG Chengzhang, et al. BJUT-3D large scale 3D face database and information processing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(6): 1009 - 1018. (in Chinese)
- 6 LI A, LIU Q, ZENG S, et al. Construction and visualization of high-resolution three-dimensional anatomical structure datasets for Chinese digital human[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(12): 1848 - 1854.
- 7 MATUSZEWSKI B J, QUAN W, SHARK L, et al. Hi4D-ADSIP 3-D dynamic facial articulation database[J]. Image and Vision Computing, 2012, 30(10): 713 - 727.
- 8 BROGGIO D, BEURRIER J, BREMAUD M, et al. Construction of an extended library of adult male 3D models: rationale and results[J]. Physics in Medicine and Biology, 2011, 56(23): 7659 - 7692.
- 9 王经纬,彭维. 3DSource 零件库:海量模型资源助力三维设计[J]. 软件世界, 2014(1-2): 76 - 78.
WANG Jingwei, PENG Wei. 3DSource component library: mass model resources help 3D design[J]. Software, 2014(1-2): 76 - 78. (in Chinese)
- 10 李许伟,匡中文,赵红超,等. 数字矿山数据库、模型及三维可视化平台的开发[J]. 煤矿现代化, 2009(4): 79 - 80.
LI Xuwei, KUANG Zhongwen, ZHAO Hongchao, et al. Development of digital mine database, model and 3D visualization platform [J]. Coal Mine Modernization, 2009(4): 79 - 80. (in Chinese)
- 11 LINDEN S, GIESSEN H, KUHLE J. XFROG—a new method for amplitude and phase characterization of weak ultrashort pulses [J]. Physica Status Solidi (b), 1998, 206(1): 119 - 124.
- 12 王忠芝,胡逊之. 基于 Xfrog 的树木建模及生长模拟[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(增刊 2): 64 - 68.
WANG Zhongzhi, HU Xunzhi. Tree modeling and growth simulation based on Xfrog[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(Supp. 2): 64 - 68. (in Chinese)
- 13 肖伯祥,郭新宇,郑文刚,等. 玉米雌穗几何造型研究[J]. 工程图学学报, 2007, 28(2): 64 - 67.
XIAO Boxiang, GUO Xinyu, ZHENG Wen'gang, et al. Geometric modeling of maize ear[J]. Journal of Engineering Graphics, 2007, 28(2): 64 - 67. (in Chinese)
- 14 肖伯祥,郭新宇,王丹虹,等. 玉米雄穗几何造型研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(4): 162 - 164.
XIAO Boxiang, GUO Xinyu, WANG Danhong, et al. Geometry modeling of the maize tassel[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(4): 162 - 164. (in Chinese)

- 15 邓旭阳,周淑秋,郭新宇,等. 玉米根系几何造型研究[J]. 工程图学学报, 2004, 25(4): 62-66.
DENG Xuyang, ZHOU Shuqiu, GUO Xinyu, et al. Study on the geometry modeling for corn root system [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(4): 62-66. (in Chinese)
- 16 赵春江,王功明,郭新宇,等. 基于交互式骨架模型的玉米根系三维可视化研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 1-6.
ZHAO Chunjiang, WANG Gongming, GUO Xinyu, et al. 3D visualization of corn root system based on interactive framework model [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 1-6. (in Chinese)
- 17 王勇健,温维亮,郭新宇,等. 基于点云数据的植物叶片三维重建[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 83-89.
WANG Yongjian, WEN Weiliang, GUO Xinyu, et al. Three-dimensional reconstruction of plant leaf blade based on point cloud data [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(5): 83-89. (in Chinese)
- 18 YIN K, HUANG H, LONG P, et al. Full 3D plant reconstruction via intrusive acquisition [J]. Computer Graphics Forum, 2015, 34(5): 1-13.
- 19 张建,李宗南,张楠,等. 基于实测数据的作物三维信息获取与重建方法研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4): 126-134.
ZHANG Jian, LI Zongnan, ZHANG Nan, et al. Advances in 3D information collection and reconstruction of crop based on the measured data [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(4): 126-134. (in Chinese)
- 20 方慧,胡令潮,何任涛,等. 植物三维信息采集方法研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 142-147.
FANG Hui, HU Lingchao, HE Rentao, et al. Research on plant three-dimensional information acquisition method [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 142-147. (in Chinese)
- 21 WU J, GUO Y. An integrated method for quantifying root architecture of field-grown maize [J]. Annals of Botany, 2014, 114(4): 841-851.
- 22 温维亮,郭新宇,王勇健,等. 葡萄树地上部形态结构数据获取方法[J]. 农业工程学报, 2015, 22(31): 161-168.
WEN Weiliang, GUO Xinyu, WANG Yongjian, et al. Morphological and structural data acquisition for above-ground part of grapevine [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 22(31): 161-168. (in Chinese)
- 23 袁晓敏,赵春江,温维亮,等. 番茄植株三维形态精确重构研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 204-210.
YUAN Xiaomin, ZHAO Chunjiang, WEN Weiliang, et al. Detailed modeling of 3-D configuration of tomato plant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 204-210. (in Chinese)

(上接第 265 页)

- 18 吴朝阳,牛铮. 基于辐射传输模型的高光谱植被指数与叶绿素浓度及叶面积指数的线性关系改进[J]. 植物学通报, 2008, 25(6): 714-721.
WU Chaoyang, NIU Zheng. Improvement in linearity between hyperspectral vegetation indices and chlorophyll content, leaf area index based on radiative transfer models [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2008, 25(6): 714-721. (in Chinese)
- 19 SMITS G F, JORDAAN E M. Improved SVM regression using mixtures of kernels [C] // Proceedings of the 2002 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2002: 2785-2790.
- 20 颜根廷,马广富,肖余之. 一种混合核函数支持向量机算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11): 1704-1706.
YAN Genting, MA Guangfu, XIAO Yuzhi. Support vector machines based on hybrid kernel function [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(11): 1704-1706. (in Chinese)
- 21 孙俊,王艳,金夏明,等. 基于 MSCPSO 混合核 SVM 参数优化的生菜品质检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 209-218.
SUN Jun, WANG Yan, JIN Xiangming, et al. Detection of lettuce quality based on parameters optimization of MSCPSO mixed kernel SVM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 209-218. (in Chinese)
- 22 高雷阜,张秀丽,王飞. 改进蚁群算法在 SVM 参数优化研究中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(13): 139-144.
GAO Leifu, ZHANG Xiuli, WANG Fei. Application of improved ant colony algorithm in SVM parameter optimization selection [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(13): 139-144. (in Chinese)
- 23 高雷阜,赵世杰,于冬梅,等. SVM 参数优化的 AFMC 算法[J]. 计算机工程与科学, 2015, 7(7): 1304-1310.
GAO Leifu, ZHAO Shijie, YU Dongmei, et al. AFMC algorithm for SVM parameter optimization [J]. Computer Engineering and Science, 2015, 7(7): 1304-1310. (in Chinese)
- 24 丁永军,张晶晶,李修华,等. 基于光谱红边位置提取算法的番茄叶片叶绿素含量估测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 292-297.
DING Yongjun, ZHANG Jingjing, LI Xiuhua, et al. Estimation of chlorophyll content of tomato leaf using spectrum red edge position extraction algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 292-297. (in Chinese)