

基于实测数据的作物三维信息获取 与重建方法研究进展

张 建^{1,2} 李宗南^{1,2} 张 楠^{1,2} 谢 静³ 贺立源^{1,2}

1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;
3. 华中农业大学理学院, 武汉 430070

摘要 作物三维信息获取与重建是农业信息化领域的关键问题, 基于实测数据的信息获取与重建方式是该研究领域的热点方向。按三维信息获取原理及工作方式进行分类, 并就每类方法的基本原理和应用进行了介绍和探讨。同时针对作物建模精度评价问题, 将现有评价方法归纳成 2 类分别进行了阐述。最后从方法融合、多参数反演、工作模式和工作范围四个方面探讨了基于实测数据作物三维信息获取与重建方法的发展动向。

关键词 三维信息; 作物三维建模; 信息获取与重建; 实测数据; 建模精度

中图分类号 S 126 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2013)04-0126-09

植物生长过程中所反映出的形态信息以及相关生理生化指标, 是支撑农作物培育相关研究不可缺少的重要信息。作物生长信息快速、高效、无损的获取一直是相关领域研究者的追求目标。与此同时, 随着农业生物信息学的快速发展, 高通量的作物表型筛选、遗传育种、突变株筛选和植物生理等研究对于作物形态等信息的快速无损获取也出现了极大需求。近年来, 随着生命科学与信息科学的进一步交叉融合^[1], 通过对植物生长过程中丰富多彩的外部形态结构及其复杂的生理过程和功能表达进行数字化和信息化, 实现植物形态结构的精确描述、可视化表达、定量分析, 以及对植物系统内部各要素的状态、发展演变过程进行定量计算、评价、模拟和预测已经成为可能, 并成为现代农业科学的一个重要发展趋势^[2]。

作物三维重建是作物形态信息获取首要解决的核心问题, 是数字作物研究的基础。植物形态结构模拟与可视化研究起源于 20 世纪 60 年代, 由于数据获取手段所限, 最初是采用参数化形态建模方法, 以 Ulam^[3] 和 Coombe 等^[4] 对植物分支模型的研究以及 Lindenmayer^[5] 提出的 L 系统为代表, 其中 L 系统方法是最具代表性的方法之一。L 系统规定了植物形态模拟的一般框架, 它具有严格的数学基础, 通过设定较少的规则, 就能模拟作物的生长过程。

根据植物拓扑结构的自相似性, 分形方法也被用于构建植物模型, 其建模方法主要有迭代函数系统、分支矩阵、粒子系统、正规文法方法和 A 系统。之后 de Reffye 等^[6] 基于随机过程理论提出了一个针对植物结构特征的专用方法 (AMAP), 将采集的作物实际生长参数输入到数据库, 并根据马尔科夫过程分析作物的拓扑结构变化规律, 采用模式识别方法提取生长规则, 构建植物的几何模型。

基于参数化和规则化的植物形态建模, 是对植物真实生长情况的一种归纳和概括, 有碍于当时数据采集手段的限制, 并没有完全忠实于现实情况。而真实准确的数据是数字植物精确建模的前提, 为满足高精度、高真实感作物三维建模的需要, 基于实测数据是一种必要手段, 相对应的作物三维模拟也是当前植物学研究的热点问题和主要发展趋势^[7]。植物形态建模经历了半个世纪的过程, 近十年来三维数据获取手段日新月异, 获取高精度作物三维数据并建立其精确模型成为可能。本文按获取原理及工作方式对作物三维形态信息获取方法进行介绍和探讨。同时针对作物建模精度评价问题, 将现有评价方法归纳成 2 类分别进行了阐述。最后从四个方面探讨基于实测数据作物三维信息获取与重建方法的发展动向。

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201364)、中央高校基本科研业务费专项(2011QC040)、湖北省自然科学基金项目(2010CDB099)和国家大学生创新训练项目(201310504002)

张 建, 博士, 讲师. 研究方向: 高通量作物表型信息获取和高光谱影像处理. E-mail: jz@mail.hzau.edu.cn

1 三维信息获取与重建方法

作物三维形态信息获取方法,从接触方式上主要可以分为接触和非接触式2种。

1.1 接触式

1)人工采集。传统作物几何形态测量主要是以手工和肉眼观测为主,使用卷尺、卡尺和量角器等工具人工测量作物各部分器官长度、半径和方向角、倾角等作物形态数据。显而易见,人工量测方式存在效率低、受测量者主观影响大以及无法获取作物三维坐标等弊端,已经被逐步淘汰。但在一些非人工作物形态量测方法中还需要靠人工测量来获取一些其他方法无法获取的部分形态信息,此时人工量测也是一种重要的补充测量手段。

2)三维数字化仪。三维数字化仪的技术原理主要是通过传感器记录并跟踪探头在三维空间中的位置,突破了计算机三维数据空间与现实三维数据空间之间的鸿沟,从而实现三维数字化的目标。

①坐标测量机。三维数字化仪是工业发展的产物,坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)的出现使测量仪器从手动方式向自动测量方式转变,与传统测量仪器(是将被测物与机械基准进行比较测量)不同的是,坐标测量机的测量实际上是基于空间点坐标的采集和计算。CMM系统的精度可以达到微米级,但由于坐标测量机是一个非移动系统,必须安装在固定平台上,对被测物也有大小限制,因此不太适合植物形态测量。Simon等^[8]使用CMM系统来对医学影像引导的外科手术系统进行精度检验。

②机械臂式三维扫描仪。机械臂式三维扫描仪可以由测量者牵引装有探针的机械臂在被测物体表面跟踪滑动扫描。根据机械臂关节上角度传感器和位置传感器可以实时获得探针所处的空间三维坐标。典型的产品有美国Immersion公司的MicroScribe和FARO公司的FaroArm。其中MicroScribe被用于获取玉米叶片上的特征点^[9],并结合曲面拟合方法建立玉米叶片的三维形态结构模型,获得了真实感较强的玉米叶片。此外,MicroScribe还被用于定量评价作物三维建模结果的精度^[10]。

③电磁式三维数字化仪。美国Polhemus公司生产的三维运动跟踪仪FastRAK,采用电磁定位原理,通过记录探头的方位及方向,获取被测物表面的三维数据。Drouet等^[11]利用FastRAK三维数字

化仪采集玉米的形态数据并进行三维建模,用于模拟和评估不同行距配置对玉米光截获效果和消光系数的影响。郑邦友等^[12]用其在田间原位精确测定水稻各器官的空间位置和几何形态,从而获取田间水稻冠层的三维结构数据。需要注意的是,因工作机制限制,电磁式三维数字化仪只能在无电磁场和金属干扰的条件下才能正常工作。

三维数字化仪相对人工采集方式,有了一定的进步,但还存在操作复杂、获取速度慢以及无法获取作物被测位置表面纹理等缺点,而且接触式测量在采集柔软、卷曲的作物器官三维信息时,会不同程度地改变其形态,从而降低其数据精度和真实性。此外,三维数字化仪无法大规模精确获取作物表面三维数据,导致了该类方法在后期建模过程中仅能依据少量形态特征点,通过借助Cardinal样条、Bezier曲线、NURBS曲面等参数化建模方法获取较为简单的作物三维模型,这是阻碍其在作物三维建模领域深入发展的重要因素。

1.2 非接触式

随着计算机技术和三维数据采集技术的飞速发展,作物三维形态信息采集方式逐步从接触式转变成非接触式。根据测量原理的不同,非接触式三维信息获取技术又可分为主动方法和被动方法^[13]。

1)主动式。主动式方法通过发射可控的辐射源,譬如激光、超声波和编码光等到被测物表面,然后检测其透射或者反射的能量,来获取被测物的三维信息。主动方式主要有脉冲测距法、结构光与编码光法以及CT和MRI方法。

①脉冲测距法。由测距设备主动向被测物体表面发射可控的探测脉冲,检测从被测物表面反射脉冲的飞行时间或相位变化,计算脉冲距离,从而得到被测物体表面的三维信息。激光、雷达和超声波等都曾被作为探测脉冲,激光测距开始多应用于树种识别、森林测高和林木材积估算,后来逐步延伸到作物三维重建的应用中。ScanStation2和柯尼卡美能达Vivid9i被用于烟草和玉米植株的三维扫描,但是由于脉冲测距技术工作机制的原因,脉冲方式的三维信息获取手段更加适合于野外等大范围场合。Cui等^[14]通过判断机载激光点云数据的强度信息和全波形数据中的距离与扫描天顶角信息,研究反演农作物覆盖度和LAI的方法。激光传感器还常被用于农业机械中来获取作物高度^[15]、密度^[16]和行间距^[17]等三维信息。Saeys等^[18]利用挂载在联合

收割机上的激光传感器对机械前方作物的三维信息进行重建,获取作物生物量密度信息用于控制机械行进速度。周梦维等^[19]通过分析全波形激光雷达发射与回波波形以及作物冠层结构的特征,实现作物与土壤波形的剥离,获得作物冠层高度。Zhang 等^[20]利用合成孔径雷达技术并结合玉米作物的结构特征,实现了对玉米作物的极化 SRA 数据分析,建立了符合玉米特征的三维结构模型和场景。而超声波测距则被用于果树冠层三维重建和体积测量^[21]。

②结构光与编码光。结构光三维重建方法是以三角法为基础,结合图像处理 and 可控光源设备进行三维建模的技术,其基本思想是利用照明光源中的几何信息辅助提取被测物的几何信息,可以采用激光或者白光生成结构光。编码光量测三维信息的原理与结构光类似,是在多线结构光法的基础上,为了解决多条纹图像中不同条纹的定位和匹配问题的一种改进,它通过应用时间、空间和彩色编码的光源来辅助测量物体表面点的三维空间信息。目前大多数手持三维扫描仪都是基于结构光原理的,例如应用较多的 FastScan 手持式激光扫描仪,它通过投射一束成扇形面的激光到被测物表面,并借助摄像机采集截面深度图像,经过计算获取被测物的三维模型。王剑等^[22]借助 FastScan 获取叶片表面三维信息,发现其在被测物表面反射较弱和强光源的情况下无法获得可靠结果。Uhrmann 等^[17]基于结构光三维重建原理设计并实现了一套单株作物三维扫描系统,并以拟南芥为对象进行了三维重建以及精度检验,获得了较好的建模精度。Bellasio 等^[23]根据作物叶绿素受光激发荧光与其叶片的生长及其角度的改变存在相关关系,利用结构光方法对作物的生长过程进行跟踪建模,获取作物叶片的大小、角度和株高等作物生长信息。方慧等^[24]基于结构光三维扫描仪配合旋转台对油菜植株进行多角度扫描,并通过噪声点剔除和点云拼接获得整个植株的三维信息,相比 FastScan,该结构光三维扫描仪获得了更加详细的点云数据,并且还可以采集到植株体的纹理和颜色信息。基于结构光原理的三维信息获取手段是目前国内外普遍认为实用性最好的三维数据采集方法,它在分辨率和速度上显示出优势,而且成本相对低廉,而此方法的缺点就是对环境光要求较高,无法测量被测物中发射较弱或者没有反射的区域。

③CT 和 MRI 方法。CT (computer tomography) 计算机断层摄影扫描技术是基于射线获得

透射图像,MRI (magnetic resonance Imaging) 核磁共振成像仪则是通过强磁场获得核磁共振图像。基于可探测被测物内部目标的特点,CT 和 MRI 方法多被用于作物根系的三维重建。Jahnke 等^[25]借助 MRI 成像手段对作物进行造影并进行三维重建,在此基础上使用同位素碳等手段无损地获取作物植株结构、物质传送路径和光合作用过程。罗锡文等^[26]采用阈值分割、区域生长等方法对植物根系 CT 序列图像进行分割处理,在此基础上选用移动立方体 (MC) 算法构建原位根系的三维模型。相比于 CT 单参数成像技术而言,MRI 是多参数成像,可以提供多种对比图像,克服 CT 在进行根系成像时因物质密度相近而造成的图像难以区分的缺点。

2) 被动式。被动式方法不需要主动向被测物投射某种光源,只需检测被测物反射环境光。一般而言,被动式方法所需设备相对简易。被动式三维信息获取方法通常是从包含被测物的图像中提取信息来重建其三维模型,其主要类型包括单幅图像法、立体视觉法、基于侧影轮廓和基于运动图像法。

①基于单幅图像。利用单幅图像中明暗、纹理、焦距等特征可以对被测物进行三维重建。Tan 等^[27]采用交互手段首先区分出树木枝干和树冠,然后根据模型库中预先定制好模型自动生成三维树木枝干和叶片。Zeng 等^[28]通过对拍摄的植物单幅图像结果进行分类、细线化和伪树枝删除,预估枝干的宽度和生长规律,获取植物的枝干结构,并由此进行三维建模。此类方法通常对画面中被测物形状、反射以及曝光情况都有限制,而且对于作物普遍存在的卷曲、旋转等情况,基于单幅图像的三维建模方法无法精确重建。另外这些方法只是依据植物分枝和叶片分布的基本原理进行视觉上的重建^[29],误差较大,不适合矮小作物。

②基于立体视觉。立体视觉方法是采用 2 幅或更多幅已经定标的图像用于重建被测物的三维模型,其基本原理是三角测量原理。Ivanov 等^[30]用计算机立体视觉方法,建立了玉米冠层的三维结构模型,从而可在三维环境下分析玉米冠层的各项结构参数,并进行了玉米群体传输的虚拟试验。Jin 等^[31]设计了一套作物植株识别系统,该系统采用了一套实时立体相机获取作物冠层的深度图像,并对其进行立体重建,结果用于提取作物冠层范围和中心,该系统可以剔除野草等目标,有较高的识别精度。Kise 等^[32]则通过在农业机械上安装 2 个多光

谱传感器,用于在田间同步采集多光谱立体影像,获取带有多光谱信息的无缝全景农田作物三维结果。Rovira 等^[33-34]进一步拓宽了双目视觉的应用范围,将一个紧凑型立体红外相机搭载在遥控直升机上获取玉米农田的立体影像,并建立三维农田地图。此外双目视觉技术在农业领域也被用于农业机械自动导航系统^[35-36]以及果实定位^[37]与采摘^[38]等方面。

③基于侧影轮廓。利用透视投影从多个角度拍摄被测物,在每个角度的画面上都会得到一条该物体的侧影轮廓线,其与对应的透视投影中心共同确定了三维空间中一个一般形状的锥体,该被测物就被包括在此锥体内,所有这些空锥体相交则构成了一个该物体的空间包络,即为被测物体外轮廓或可视外壳的近似体。

侧影轮廓三维建模方法因为相对简便易行,在作物三维建模中有较多应用,同时也出现了一些商业软件。Clark 等^[39]对2种不同基因型水稻进行为期10 d的根系生长观测,每天采集每种类型水稻根系图像40张,利用RootReader3D软件进行三维建模和分析,可识别5种水稻根类型和27种根系表观特性。此外应用较多的还有3D SOM^[40]三维建模软件,Paproki 等^[41]利用此软件实时获取作物三维高通量表型信息。青克乐其其格等^[42]借助数字视频显微镜采集稻谷的显微图像,提取稻谷图像边缘点的二维形态特征参数进行稻谷三维建模,获得了较好效果。因为被测物轮廓信息是一种准确客观的信息形式,所以轮廓提取的精度也决定了建模的效果,相比其他建模方法,轮廓法具有建模速度快、稳定性高、经济实惠、简单易行等特点。此外,由于算法本身的局限,轮廓法无法计算出被测物表面的深度信息,通过增加拍摄角度可以在一定程度上改善其不足。

④基于运动图像。此方法通过在2幅或多幅未标定的图像间检测可用于匹配的特征点集,使用数值方法计算相机运动参数和被测物的几何参数,得到物体三维模型。杨亮等^[43]提出一种基于多幅图像的黄瓜叶片形态三维重建方法,首先提取叶片边缘及主脉的特征点,并结合极线约束和SIFT特征描述算子对特征点进行匹配,获取特征点的三维坐标。王传宇等^[44]提出一种基于图像的农田景物三维重建方法,以SIFT匹配点的视差作为搜索范围初始限制条件,按像素邻域的SSD值匹配2幅图像中的像素,获得致密的视差图并以三维点云形式重

建田块景观,并将二维图像像素RGB值映射到三维点云上。

⑤逐层切片恢复法。该方法是将被测物一层层进行切片,并逐层成像,然后根据所有层的图像信息重建出物体的三维结构。该方法既可以得到物体的表面信息,也可以得到物体的内部结构信息。闫伟平等^[45]以140 μm为间隔对黄瓜茎进行切片并成像,通过区域生长法进行图像区域分割,在此基础上结合步进立方体和合成体绘制方法,实现黄瓜茎维管束的三维可视化。逐层切片恢复法适合于以获取被测物内部三维形态为目的的场合,但它是一种破坏性的方法,而且费时费力,因此在作物三维建模领域应用不多。

针对各类作物三维信息获取手段的特点及适用情况,笔者从测量速度、数据量、准确度、被测物尺寸、是否同步采集纹理和硬件要求等方面进行了比较(表1)。

2 重建精度与不确定性评价

作物三维模型是对作物实体外形表观的一种模拟,模型精度越高说明模拟的效果越好。作物三维建模结果的精度直接关系到后续研究和应用的效果,由于作物整体形态的复杂性以及各类器官组织形态所表现出来的不同特性,导致无法建立较为完整的作物三维形态检验数据,现有方法主要还是借助人工测量或利用接触式的三维数字化仪^[10]获取相关作物形态特征数据,用于各类方法三维重建之后模型的精度检验。现有作物三维建模的精度评定方法基本可以分为2大类:基于重投影误差的精度分析方法和基于实测与模拟数据的统计分析方法。

2.1 基于实测数据与模拟数据的统计分析方法

运用统计学知识分析实测数据与模拟数据间的差异,评价建模结果的精度。目前基于实测数据与模拟数据的统计分析方法主要包括:基于统计量、1:1作图、回归分析、Bland-Altman方法等。

1)基于统计量。主要用根均方差(RMSE)、平均绝对百分误差(MAPE)、绝对误差等来比较实测值与模拟值。

①RMSE。即均方根误差或标准误差,可以作为衡量测量精度的一种数值指标,其常用的形式有公式(1)和(2)2种。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (1)$$

表 1 多种作物三维信息获取手段比较¹⁾

Table 1 A comparison for various 3D modeling methods of crop

接触方式 Type of contact	测量方式 Type of measurement	方法类型 Type of method	测量速度 Measurement speed	数据量 Data volume	准确度 Accuracy	被测对象尺度 Size of object	采集图像 Image acquisition	硬件要求 Hardware requirement
接触式 Contact	人工 Manual	人工采集 Artificial acquisition	★	★	★★★	中小型 Middle and small	无 No	简单 Simple
		坐标测量机 CMM	★★	★★	★★★★★	小型 Small	无 No	复杂 Complex
	三维数字化仪 3D digitizer	机械臂式三维扫描仪 Mechanism arm	★★	★★	★★★★	小型 Small	无 No	较复杂 Slightly complex
		电磁式三维数字化仪 Electromagnetic	★★	★★	★★★★	中小型 Middle and small	无 No	较复杂 Slightly complex
		脉冲测距法 Pulse distance measurement	★★★★★	★★★★★	★★★★★	大型、广域 Big and wide area	无 No	复杂 Complex
	主动式 Activeness	结构光与编码光 Structured light and coded light	★★★	★★★★★	★★★★★	中小型 Middle and small	无 No	较复杂 Slightly complex
		CT 和 MRI 方法 CT and MRI	★★★	★★★	★★★	小型 Small	有 Yes	非常复杂 Very complex
非接触式 Non-contact	被动式 Passiveness	单幅图像 Single image	★★★★★	★★	★★	不限 No limit	有 Yes	简单 Simple
		立体视觉 Stereo vision	★★★★★	★★★	★★★	不限 No limit	有 Yes	简单 Simple
	侧影轮廓 Silhouette	★★★★	★★★★	★★★	不限 No limit	有 Yes	较简单 Slightly simple	
	运动图像 Moving images	★★★★	★★★★	★★★	不限 No limit	有 Yes	较简单 Slightly simple	
	逐层切片恢复法 Slices recover	★★	★★★	★★★★	小型 Small	无 No	较复杂 Slightly complex	

1)部分评价指标用星号表示,分为5个等级,星号越多,表示表现越好。Part of the evaluation index use the asterisk. The evaluations have five degree which are represented by the asterisk. And more asterisk is better.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \times \frac{100\%}{OBS_i} \quad (2)$$

其中, OBS_i 、 SIM_i 分别表示实测值与模拟值, n 为样本容量, OBS_i 为实测值的平均值。对于第 2 个公式中的 RMSE, 其值小于 10%, 表明实测值与模拟值的一致性非常好, 在 10% ~ 20% 之间比较好, 20% ~ 30% 之间模拟效果一般, 大于 30% 表明模拟值与实测值偏差过大, 模拟效果差。

②MAPE。即平均绝对百分误差, 也是一种定量的评定模型精度的指标, 见公式(3)。

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|OBS_i - SIM_i|}{OBS_i}}{n} \times 100\% \quad (3)$$

其中, OBS_i 、 SIM_i 分别表示实测值与模拟值, n 为样本容量。由 MAPE 的公式可以看出, 其值越小, 说明模拟值与实测值的差异越小, 反之则越大。

2)1:1 作图。与 RMSE 定量的分析模型精度不同, 1:1 图定性且直观地展示模型的符合度与可

靠性。1:1 图中的横坐标为实测值, 纵坐标为模拟值, 1:1 图中直线方程为: $y=x$, 图中点距直线越近, 说明模拟值越接近于实测值, 模型的精度也越高。

3)回归分析。评定作物三维模型精度时, 如果样本数量比较大, 可以对植株的某个形态指标的实测值与模拟值进行回归分析, 利用回归方程的决定系数来判定自变量对因变量的解释程度。赵春江等^[46]在利用提取的三维骨架对玉米植株的株型参数进行验证时, 使用的方法便是回归分析。

4)Bland-Altman 方法。Bland-Altman 的目的是针对人工测量与作物三维建模结果之间的一致性或者不确定性进行评价, 量化三维建模的可靠性。该方法在作物三维模型精度评定中应用比较少见, Paproki 等^[41]在分析实测值和由作物三维模型自动获取的数据间的差异时, 使用 Bland-Altman 图对异常值进行直观地表述。

实际应用中, 往往将以上几类方法结合使用, 从而实现既能对模拟值与实测值间的差异进行量化又

能以图表的形式对模型精度进行定性而直观的展示。Lati 等^[47]在由三维模型估计植物的生长参数时,采用 RMSE 等指标对植物的高度和叶覆盖面积的精度进行了有效评定。Rinaldi 等^[48]使用向日葵对 OILCROP-SUN 模型进行验证时,采用 RMSE 等统计量对该模型进行定量分析,并使用 1:1 图对模型精度进行直观评估。石春林等^[49]在水稻冠层结构的动态模拟研究中,以 RMSE 及 1:1 图对水稻器官伸长模型进行了检验并得出所建模型可较准确地描述水稻器官伸长和结构特征的动态变化的结论。

基于实测数据与模拟数据的统计分析方法在作物形态模拟、作物冠层结构动态模拟研究中的应用非常广泛,但在基于实测数据的作物三维模型精度评定研究应用较为少见,而统计方法中提到的统计量、统计图及回归方程也适用于作物三维模型精度的评定。

2.2 基于重投影误差的精度分析方法

另一种精度评价方法就是采用重投影误差作为衡量指标,即先求出相机的投影矩阵及空间点的三维坐标,再根据该投影矩阵将这些空间点投影到对应的图像上,最后计算投影后的点与原对应点之间的差异。比较常见的重投影误差计算^[50]见公式(4)。

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{4n}} \left(\sum_{i=1}^n d(X_i^1, \overline{H^1 X_i})^2 + \sum_{i=1}^n d(X_i^2, \overline{H^2 X_i})^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中, $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为已经求得的三维空间中 n 个点的齐次坐标, H^1 和 H^2 分别为 2 个相机矩阵, $X_i^j (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2)$ 为第 i 个空间点在第 j 幅图像上的非齐次坐标, 公式中 $\overline{H^1 X_i}$ 和 $\overline{H^2 X_i}$ 中的上横线表示相应的非齐次坐标。

重投影误差作为一种定量评价指标被广泛应用于三维模型的精度评定中。夏丹^[51]在植物形态三维扫描系统关键技术研究中,使用该方法计算重建模型的投影图像与真实物体投影图像的像素数量差异来判断三维数字化模型的重建精度。张伟^[52]也使用相同的方法对自行研发的三维重建软件构建的模型精度进行评定。

重投影误差反映了三维重建点在图像上的重投影点与图像上对应点的距离差异,能够间接地对三维模型的精度进行量化评定。重投影误差的原理简单,易于在计算机上实现,而作物植株三维模型的结构往往比较复杂,其精度评定比较困难,所以将重投影误差引入作物三维建模领域,将对该领域的研究工作起到促进作用。此外,将重投影误差法与统

计分析方法相结合,也可以提高作物三维模型的精度检验效果,为重建更加符合被测物的三维模型提供更科学的衡量标准。

3 发展动向及展望

作物三维建模经历了从参数化方式到基于实测数据的转变,经历了从追求虚拟效果到可精确量测、从单个器官到整株作物直至作物群、从实验室走向田间、从简单形态数据获取到多参数的生理生化指标获取的发展过程。作物三维数据获取技术的高速发展是相关技术进步和社会需求共同驱动的结果,其发展成果势必进一步拓宽其在农业生产和研究领域的应用范围和深度。

3.1 信息来源从单一数据向多源数据融合转变

三维建模方法各有特点,而实际应用中对采集效果的无尽追求,使得不同类型的三维建模方法产生融合。Weiss 等^[53]在农业机械自动驾驶研究中通过同步获取激光点云数据和图像,利用其互补特性将近景激光点云和影像数据进行融合,进行农田场景三维重建,实现垄行实时自动识别。王传宇等^[54]将主被动三维数据获取方法进行结合,以双目立体视觉技术对玉米叶片进行三维重建与三维测量,同时引入结构光法增强立体匹配的精度和准确性。张志玉^[55]通过将 Lidar 和 SAR 数据结合共同反演植物生物量,通过获取激光三维点云数据辅助生物量制图,提高了反演精度。

3.2 信息获取能力从单一指标向多项指标转变

方法融合中的许多实例实质上也是信息融合,其目的主要还是为了更有效地进行作物三维重建。而信息融合在一定程度上可以借助其他手段获取作物更多的生理生化信息。世界第一台高光谱三维激光扫描仪的原型机已经诞生于芬兰,该原型系统具有 8 个波段,结合激光点云数据,可以获取被测物带有高光谱信息的三维模型^[56]。鉴于高光谱手段在信息识别方面超强的分辨能力,结合作物三维模型,在立体空间模式下,可获取作物生长过程中多种生理生化指标的空间分布,因此该类系统的出现及应用值得期待。不借助激光三维建模的类似方法也有报道,Zavattini 等^[57]利用结构光法将光栅投射到被测物上,并利用高光谱相机进行影像获取,通过解算在被测物上光栅的形状获取被测物的三维形态信息,同时通过对高光谱影像进行特征提取和分析,可以获得待提取特征对应的空间位置。相比之下,基

于图像的被动式三维信息获取方法也可以借助高光光谱成像技术,采取相应的方法获取作物附带高光光谱信息的三维模型,与基于激光点云方法相比,由于三维信息和高光光谱信息同是来源于同一高光光谱影像,所以在数据采集和处理方面相对简单一些。

3.3 信息获取与重建过程从人工采集向自动获取转变

基于激光或成像方式的三维建模方法的出现使作物三维形态信息获取变得十分便捷和高效,计算机视觉技术的快速发展使得作物三维模型自动化精准重建也成为可能。德国 LemnaTec 公司研制开发了全自动高通量植物 3D 成像系统 Scanalyzer 3D,该系统基于侧影轮廓方法通过借助不同光谱响应范围的传感器,如可见光、近红外和红外等,自动获取作物图像并进行三维重建^[58]。此类系统实现了全自动数据获取、处理和分析,同时也使作物三维信息获取从理论研究走向实际应用。

3.4 信息获取与重建对象从实验室向田间转变

田间作物三维信息可以提供更加准确的作物长势信息以及为农业机械自动化运行提供三维信息,因此也有强大的实际需求。Busemeyer 等^[59]用拖拉机挂载一套多传感器系统,获取作物株高、LAI 等农学参数。Rovira-Más 等^[60]在小型无人直升飞机上挂载立体相机,获取农田的立体图像建立三维农田和作物模型。Montalvo 等^[61]基于侧翼轮廓三维建模方法,识别作物垄行位置,为农业机械自动驾驶和作业提供农田作物三维信息。随着作物三维信息获取与重建技术的成熟,可以预见更多的应用将从实验室走向田间。

4 结 语

限于对信息技术的依赖,基于实测数据的作物三维形态信息获取与建模相关研究时间并不长,但其高速发展显示了众多领域对它的强烈需求。随着各种三维信息获取手段不断革新,使得实时、无损、精确和高效获取作物形态数据成为可能,同时数据获取范围也已经不再局限于实验室。在此发展背景下,针对具体应用的不同改良和提高数据获取能力的研究还需继续,但对于同等重要甚至更为关键的作物三维信息自动分析也需要深入研究。对于同步获取了如高光光谱数据等信息的三维模型中,如果加强后期数据分析能力,则可以得到作物更加丰富的生理生化信息。此外,基于实测数据获取的三维作

物模型忠实于被测物是其主要优点,但获取的三维模型特别是整株作物或作物群体,如果缺乏后期分割处理,就无法对作物深层次信息进行挖掘与分析,比如对某种作物器官的单独量测和跟踪分析。因此,虽然基于实测数据的作物三维形态信息获取与建模研究到目前已经有了长足进步,但要将其高度自动化、智能化地投入到生产实践、科学研究中,则还需要持续性的深入研究。

参 考 文 献

- [1] 顾坚磊,周雁. 中国基因组生物信息学回顾与展望[J]. 中国科学 C 辑:生命科学,2008,38(10):882-890.
- [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.
- [3] ULAM S M. Adventures of a mathematician [M]. Berkeley: Univ of California Press,1991.
- [4] COOMBE B G, COHEN D, PALEG L G. Barley endosperm bioassay for gibberellins, Parts I and II [J]. Plant Physiol, 1967,42(1):105-119.
- [5] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interaction in development, Parts I and II [J]. Journal of Theoretical Biology, 1968,18:280-315.
- [6] DE-REFYE P, EDELIN C, FRANEON J, et al. Plant models faithful to botanical structure and development[J]. Computer Graphics, 1988,22(4):151-158.
- [7] 肖伯祥,郭新宇,陆声链,等. 作物三维形态虚拟仿真技术体系研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2012,20(4):539-551.
- [8] SIMON D A, O'TOOLE R V, BLACKWELL M, et al. Accuracy validation in image-guided orthopaedic surgery: proceedings of the Second International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery[C]. Baltimore, MD, 1995.
- [9] 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.
- [10] CHÉNÉ Y, ROUSSEAU D, LUCIDARME P, et al. On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,82:122-127.
- [11] DROUET J L, KINIRY J R. Does spatial arrangement of 3D plants affect light transmission and extinction coefficient within maize crops? [J]. Field Crops Research, 2008,107(1):62-69.
- [12] 郑邦友,石利娟,马韬韬,等. 水稻冠层的田间原位三维数字化及虚拟层切法研究[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1181-1189.
- [13] HERNÁNDEZ-ESTEBAN C, SCHMITT F. Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004,96(3):367-392.
- [14] CUI Y K, ZHAO K G, FAN W J, et al. Retrieving crop fractional cover and LAI based on airborne Lidar data [J]. Journal of Remote Sensing, 2011,15(6):1276-1288.

- [15] ZHANG L, GRIFTT E. A lidar-based crop height measurement system for *Miscanthus giganteus* [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 85: 70-76.
- [16] EHLERT D, HEISIG M, ADAMEK R. Suitability of a laser rangefinder to characterize winter wheat [J]. Precision Agriculture, 2010, 11(6): 650-663.
- [17] UHRMANN F, SEIFERT L, SCHOLZ O, et al. Improving sheet-of-light based plant phenotyping with advanced 3D simulation [M]. Berlin: Springer, 2011: 253-263.
- [18] SAEYS W, LENAERTS B, CRAESSAERTS G, et al. Estimation of the crop density of small grains using LiDAR sensors [J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(1): 22-30.
- [19] 周梦维, 柳钦火, 刘强, 等. 基于机载小光斑全波形 LIDAR 的作物高度反演 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 183-188.
- [20] ZHANG L, LI X, DU H, et al. Coherent polarimetric SAR simulation of maize [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(4): 621-636.
- [21] 俞龙, 洪添胜, 赵祚喜, 等. 基于超声波的果树冠层三维重建与体积测量 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 204-208.
- [22] 王剑, 周国民. 利用激光扫描仪获取作物三维模型的方法 [J]. 湖北农业科学, 2008, 47(1): 104-106.
- [23] BELLASIO C, OLEJNÍČKOVÁ J, TESARĚ R, et al. Computer reconstruction of plant growth and chlorophyll fluorescence emission in three spatial dimensions [J]. Sensors, 2012, 12(1): 1052-1071.
- [24] 方慧, 胡令潮, 何任涛, 等. 作物三维信息采集方法研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 142-147.
- [25] JAHNKE S, MENZEL M I, VAN-DUSSCHOTEN D, et al. Combined MRI-PET dissects dynamic changes in plant structures and functions [J]. The Plant Journal, 2009, 59(4): 634-644.
- [26] 罗锡文, 周学成, 严小龙, 等. 基于 XCT 技术的植物根系原位形态可视化研究 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 104-106.
- [27] TAN P, FANG T, XIAO J, et al. Single image tree modeling [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) ACM, 2008, 27(5): 108.
- [28] ZENG J, ZHANG Y, ZHAN S. 3D tree models reconstruction from a single image: IADA'06 Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications [C]. Jinan: IEEE Computer Society Press, 2006: 445-450.
- [29] 赵春江, 郭新宇, 陆声链. 农林植物生长系统虚拟设计与仿真 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 31-38, 23-24.
- [30] IVANOV N, BOISSARD P, CHAPRON M, et al. Estimation of the height and angles of orientation of the upper leaves in the maize canopy using stereovision [J]. Agronomie, 1994, 14(3): 183-194.
- [31] JIN J, TANG L. Corn plant sensing using real-time stereo vision [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6/7): 591-608.
- [32] KISE M, ZHANG Q. Creating a panoramic field image using multi-spectral stereovision system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 67-75.
- [33] ROVIRA-MÁS F, ZHANG Q, REID J F. Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereovision [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(3): 251-259.
- [34] ROVIRA-MÁS F, ZHANG Q, REID J F. Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2): 133-143.
- [35] KISE M, ZHANG Q, ROVIRA-MÁS F. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 357-367.
- [36] KISE M, ZHANG Q. Development of a stereovision sensing system for 3D crop row structure mapping and tractor guidance [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 191-198.
- [37] BAKHSHIPOUR A, JAFARI A, HOSSEINIS M. Recognition of pomegranate on tree and stereoscopic locating of the fruit [J]. American-Eurasian J Agric & Environ, 2012, 12(10): 1288-1294.
- [38] ZOU X, ZOU H, LU J. Virtual manipulator-based binocular stereo vision positioning system and errors modelling [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(1): 43-63.
- [39] CLARK R T, MACCUDY R B, JUNG J K, et al. Three-dimensional root phenotyping with a novel imaging and software platform [J]. Plant Physiology, 2011, 156(2): 455-465.
- [40] BAUMBERG A, LYONS A, TAYLOR R. 3D SOM—a commercial software solution to 3D scanning [J]. Graphical Models, 2005, 67(6): 476-495.
- [41] PAPROKI A, SIRAUULT X, BERRY S, et al. A novel mesh processing based technique for 3D plant analysis [J]. BMC Plant Biology, 2012, 12(1): 63.
- [42] 青克乐其其格, 郭新宇, 肖伯祥, 等. 基于多角度图像的水稻稻谷几何建模方法研究 [J]. 中国传媒大学学报: 自然科学版, 2011, 18(3): 72-75.
- [43] 杨亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态三维重建 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 141-145.
- [44] 王传宇, 赵春江, 郭新宇, 等. 基于数码相机农田景物三维重建 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(33): 266-272.
- [45] 闫伟平, 杜建军, 郭新宇. 黄瓜茎维管束图像分割与三维可视化技术研究 [J]. 农机化研究, 2013, 2(5): 9-13.
- [46] 赵春江, 杨亮, 郭新宇, 等. 基于立体视觉的玉米植株三维骨架重建 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 157-162.
- [47] LATI R N, FILIN S, EIZENBERG H. Estimation of plants' growth parameters via image-based reconstruction of their three-dimensional shape [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(1): 191-198.
- [48] RINALDI M, LOSAVIO N, FLAGELLA Z. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy [J]. Agricultural Systems, 2003, 78(1): 17-30.
- [49] 石春林, 朱艳, 曹卫星, 等. 水稻冠层结构的动态模拟研究 [J]. 作物学报, 2006, 32(12): 1831-1835.
- [50] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision 2nd edition [M]. New York: Cambridge University Press, 2000: 132-134.

- [51] 夏丹. 植物形态三维扫描系统关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2012.
- [52] 张伟. 多视图三维重建算法与软件实现[D]. 合肥: 安徽大学图书馆, 2006.
- [53] WEISS U, BIBER P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(5): 265-273.
- [54] 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.
- [55] 张志玉. 基于 lidar 和 SAR 数据的生物量反演[D]. 北京: 北京师范大学图书馆, 2011.
- [56] LUOTOLA J. Erotaa mädät omenat tuoreista-suomalaiset kehittivät ensimmäisen monikanavaisen laserkeilaimen. [2012-10-28]. <http://www.tekniikkatalous.fi/innovaatiot/erottaa+madat+omenat+tuoreista+ndash+suomalaiset+kehittivat+ensimmaisen+monikanavaisen+laserkeilaimen/a850973?s=u&w:tt=29102012>.
- [57] ZAVATTINI G, VECCHI S, MITCHELL G, et al. A hyperspectral fluorescence system for 3D *in vivo* optical imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51(8): 2029.
- [58] MOGEL V, KARL H. Taking the phenomics revolution into the field [J]. *CSA News*, 2013, 58(3): 4-10.
- [59] BUSEMEYER L, MENTRUP D, MÖLLER K, et al. Breed vision—a multi-sensor platform for non-destructive field-based phenotyping in plant breeding[J]. *Sensors*, 2013, 13(3): 2830-2847.
- [60] ROVIRA-MÁS F, ZHANG Q, REID J F. Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoisomages[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(3): 251-259.
- [61] MONTALVO M, PAJARES G, GUERRERO J M, et al. Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(15): 11889-11897.

Advances in 3D information collection and reconstruction of crop based on the measured data

ZHANG Jian^{1,2} LI Zong-nan^{1,2} ZHANG Nan^{1,2} XIE Jing³ HE Li-yuan^{1,2}

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

2. *Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China;*

3. *College of Science and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract Crop 3D modeling is a key problem of agricultural informationization. Crop 3D information collection and reconstruction is the hotspot. Methods of crop 3D information collection and reconstruction were classified according to the principle and operation mode. The basic principle and application of each method was presented and discussed. The problems of the accuracy of crop 3D modeling were divided into two classes and introduced respectively. Finally, the prospect of crop 3D information collection and reconstruction based on the measured data was discussed from four aspects including the methods fusion, the multi-parameter inversion, the operating mode and the scope of work.

Key words 3D information; crop 3D modeling; information collection and reconstruction; measured data; accuracy of modeling

(责任编辑: 张志钰)