

农林作物三维重建方法研究进展*

刘刚¹ 司永胜² 冯娟²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

摘要: 农林作物的三维重建对于研究其生物学特性、冠层光照分布以及农业机器人应用等都具有重要的作用。农林作物结构比较复杂,快速准确地对农林作物进行三维重建具有较大的挑战性,农林作物三维重建方法得到了相关研究领域的广泛关注。本文根据使用的核心设备或技术的不同,将常见的农林作物三维重建方法分为4类,即基于规则的方法、基于图像的方法、基于扫描的方法和基于三维数字化仪的方法。按此分类,总结阐述了各种方法的硬件系统及其在农林作物三维重建中的应用情况,分析和比较了不同方法优缺点及应用范围,提出了农林作物三维重建的未来研究发展趋势。

关键词: 作物 三维重建 综述

中图分类号: Q944; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0038-09

引言

农林作物的三维重建是将现实中的作物用模型的方式再现出来,是虚拟现实技术在农业中的应用。作为信息技术与农业生产的一种结合,虚拟现实技术是农业信息化的一个重要手段,是世界上主要农业国家农业技术研究的重要方面^[1]。计算机技术与农业知识的有机结合使得对农作物形态结构和生理功能的研究跨入到数字化、可视化的阶段,在计算机上以三维可视的方式来分析、研究和设计农作物的形态结构和生长过程已经成为可能。由于植物的复杂性,植物形态模型的建立比机械零部件、建筑物等建模更加困难,建立植物的三维模型一直是植物学、计算机图形学等方面的研究热点^[2-4]。

根据三维重建的对象,可分为果树的三维重建和农业作物三维重建。树木枝干大小、枝干密度和冠层大小等属性,对于林业管理,尤其是收获前管理非常重要^[5]。此外,果树的三维重建对于自动采摘机械^[6-7]、果树的机械剪枝^[8]和果树冠层光照研究等都有重要作用^[9]。在农业作物方面,作物的冠层结构因素直接影响作物最终的产量,如株型、叶面积指数、叶片的形状和大小、叶片方位角分布、叶片散射吸收和反射、叶片空间分布的异质性等特性,以及这些特性随作物品种、生长发育阶段和种植密度的

变化而变化。准确及时地获取作物的上述信息,对于深入研究作物的生物特性是必要的^[10]。同时,在生产和科研中,作物的形态特征对于优选育种、长势监测、长相评价等均有重要意义。作物的形态特征信息目前主要靠人工测量和目测等方式获取,存在速度慢、强度大、主观性强和误差大等缺陷。随着农林作物三维重建技术的发展,为解决上述问题提供了新的方案^[11]。

根据所采用的方法,农林作物的三维重建可分为基于规则的方法、基于图像的方法、基于扫描方式的方法和基于三维数字化仪的方法等^[7]。

按照上述分类,本文将逐一阐述各种方法的硬件系统以及在农林作物三维重建中的应用情况,并分析和比较不同方法优缺点及应用范围,最后探讨作物三维重建的未来研究发展趋势。

1 基于规则的作物三维重建

农业是一个复杂的大型系统,其研究对象仅仅依靠实地的研究实验是不够的。为了使研究更加广泛深入,在农业研究中采用模型机制就显得十分必要^[1]。

基于规则的方法可从生理生态上动态模拟真实植物的自然生长过程,而其动态结构模型是通过植物实际生长过程中的拓扑结构演变和几何形态变

收稿日期: 2014-02-14 修回日期: 2014-03-15

* 国家自然科学基金资助项目(31371532)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102406)和河北省科技计划自筹经费项目(13237210)

作者简介: 刘刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

化规律等研究建立的。根据所测的大量植物信息来提取植物的生长规则,建立植物的生长模型,来模拟植物的真实生长过程。对于某种特定的植物,可通过改变模型参数得到该植物的多种形态结构。当前最著名的动态结构模型有 L-系统和自动机模型等^[12]。例如,基于规则的方法能够利用生长规则模拟计算出某个生长周期内植物的生理状态和几何形态,然后基于植物的这些信息通过可视化技术绘制出作物的三维形态。

1.1 基于 L-系统的作物三维重建

L-系统全称是“字符串重写系统(String rewriting system)”,由美国生物学家 Lindenmay 于 1968 年首次提出,Lindenmay 利用该系统对多细胞生物的生长进行了模拟^[13]。此后,由 Szilard 等^[14]提出并由 Prusinkiewicz 等^[15-16]进一步发展的龟图解译(Turtle interpretation)算法,使得植物生长模拟方法能够很好地控制植物生长的可视化过程,并真实地模拟现实世界中各种形态的植物及其生长环境。此后,Prusinkiewicz 等对 L-系统进行了长期的研究,使 L-系统一直处在不断完善和发展中^[17-20],已经由最初的只能表达严格迭代过程的 DOL 系统,逐步发展成为能够可构造随机拓扑结构的随机 L-系统(Stochastic L-system)、可模拟植物器官相关性的上下文相关 L-系统(Context-sensitive L-system)、通过控制和改变参数实现植物的灵活三维建模的参数 L-系统(Parametric L-system)^[19];为了模拟植物的连续生长过程,Prusinkiewicz 等提出了时变 L-系统(Timed L-system)^[20]以及能够模拟植物与外界环境之间的信息交互作用的开放式 L-系统(Open L-systems)等。Prusinkiewicz 不仅对 L-系统模拟植物作了深入研究,还应用他们的研究成果开发了 L-studio/Vlab 植物建模软件^[3]。L-studio/Vlab 采用了一种称为 L+C 的建模语言,使用该语言能够实现不同类型植物的模拟,并且该系统还具有三维可视化的功能,能够用三维动画的形式表现出植物生长的过程^[21]。L-系统作为功能强大的模拟方法,已经广泛用于软件开发和科学研究领域,它强调计算机图形学与植物生长机理的结合^[3]。Honda^[22]建立了热带树枝几何模型,首次实现了树结构计算机模拟;Hackett^[23]首次进行了根系二维分枝模拟研究;Fournier 等依据 L-系统和计算机图形学实现了对玉米生长发育过程的三维结构模拟,对玉米生长过程进行了研究^[24]。近年来,国内一些学者以 L-系统为基础,对棉花、大豆、玉米、大麦、高粱等农作物进行了模拟^[25]。由于根系环境的不可见性和复杂性,以及测量技术和理论方法的局限性,对于根系部

分的三维重建更具挑战性。王美丽等^[26]、赵春江等^[2]结合 L-系统和 OpenGL 三维图形库技术,分别建立了小麦、玉米的根系的生长模型,对根系的生长发育过程、根系中各根个体的空间分布进行模拟,最后实现了小麦、玉米根系的三维重建。为了真实地模拟果树枝干形态,胡秀珍^[12]提出形态特征信息和参数 L-系统相结合的果树枝干可视化方法,使用 OpenGL 三维建模技术将梨树生长几何信息转为直观的三维可视化图形信息,模拟出梨树常见树形的基本形态结构。李松阳^[27]采用 L-系统控制和模拟根系的生长发育,模拟根生长与土壤水分的交互,分析了玉米植株不同位置水势随土壤水势变化的特征,模拟了在不同水分亏缺环境下,玉米植物整体的生长过程,并开发了软件,支持植物株体、根系和整株与水分的交互,并借助 Java 3D 图形库对模拟结果进行可视化展示,借助 Matlab 对土壤含水率的三维空间和累计吸水量进行了可视化模拟。

1.2 基于自动机模型的作物三维重建

自动机模型,又称参考轴技术,由法国农业发展国际会议中心(CIRAD)的 de Reffye 等提出。这种方法主要原理是将植物的生长看作是一个具有一定概率分布的随机过程,如某个位置的芽是否产生分枝、分枝的类型与出现的时间等,利用马尔可夫链理论以及状态转换图分析植物拓扑结构演化规律,通过模式识别方法提取生长规则,在此基础上,模拟植物的生长发育过程^[28]。Godin 等^[29]在此基础上提出了能够以不同的时间长度来描述植物拓扑结构的多尺度意义下的植物拓扑结构模型。这种模型,其建模方法的物理意义明确、数据输入简单、过程分析直观,同时该方法很容易把周围的环境参数集成到该系统中,是农学和生物学研究的一个非常有效的工具,被认为是比较符合植物生长规律的模型。

法国农业研究发展中心(CIRAD)基于参考轴技术,开发了包含若干子系统软件的 AMAP 系统^[30]。AMAP 系统系列软件在植物生长机理模型与可视化模型结合方面取得了卓有成效的进展。AMAP 系统用于模拟植物生长的软件包括两个核心部分。第一部分是如何表达植物的拓扑结构,它包含了植物器官在空间中定位的几何信息、植物生长原理、外界环境对植物生长的影响、植物之间竞争以及互利机制对植物群落生长的影响等。第二部分是植物的各个器官的建模(例如根、茎、叶、花瓣和果实等)^[31]。AMAP 系统软件在进行植物的动态模拟时,需要利用外界输入或者创建的模型和参数变量。如果在某一实际年龄或生理年龄段内没有数据,AMAP 软件就会根据已有的数据自动进行插值,也

能产生一个真实的三维虚拟植物^[32]。Danjon等^[33]利用一个数字化设备以及AMAP软件对橡树树根进行了三维重建,用AMAP估计根构型的一些特性参数,包括空间位置、根长度和体积,分支顺序和分支方式等。同时利用数字化设备对该根进行三维重建,获得了较为相似的结果。

1.3 基于双尺度及多尺度自动机的作物三维重建

赵星等^[12,34-35]根据植物生长的拓扑规律及生理生态特性,基于计算机图形学方法,利用悬臂梁表示枝条,提出了基于双尺度自动机模型的枝条弯曲模拟算法。该算法能有效地生成自然逼真的枝条弯曲形状,在表现植物拓扑生长规律方面有较大的改进。算法中参数的物理意义明确,结构简洁,形象直观,易于理解和编程实现。此外,该模型还应用了符合植物顶芽和腋芽生长过程的概念模型,更适合模拟真实植物的生长过程。在此基础上,我国和法国的研究人员合作开发了Greenlab系统^[36],以数学公式描述模型,弥补了AMAP系统在模拟植株的生理生态功能的欠缺,克服了AMAP系统只能模拟简单形态结构的不足,而且具有计算时间短的优点。姚芳^[37]对双尺度自动机模型进行了部分改进,采用改进后的双尺度自动机和L-系统相结合的方法,构建了小麦根系的形态重建模型。为了克服双尺度自动机和AMAP系统生长模型的参数过于复杂,且需要用户手工输入的不足,屈洪春等^[38]提出了一种根据植物个别采样数据进行多尺度分析的植物分枝结构自动重建方法,能够通过植物个别植株生长单元(GU)和叶元(Metamer)两级组织的形态和几何特征,进行采样、多尺度分析,来重建特定种类植物的三维分枝结构。

2 基于图像的作物三维重建

基于图像的作物三维重建是利用相机获取图像,利用机器视觉原理获取作物冠层或感兴趣部分的三维重建。

基于图像的作物三维重建主要应用于采摘、剪枝等应用研究领域。

2.1 基于双目或多目视觉的作物三维重建

最常见的双目视觉是由2个摄像机构成立体摄像机,根据立体视觉原理进行目标的三维位置计算。和其类似的是,由一个摄像机拍摄一幅图像后,移动到另外一个已知位置,拍摄另外一幅图像,利用立体视觉原理进行目标三维重建,其本质和双目立体视觉方法相同。在此将其归类为两个摄像机的情况。当前的技术条件下,常规摄像机构成的双目立体视觉系统,很难对作物整体进行快速精确的三维重

建^[39]。因此,一般是对作物冠层感兴趣部分,如叶片、花卉或果实部分等进行三维重建。

果实的三维重建技术被广泛应用于采摘机器人的视觉系统中。Han等^[6]利用安装在机械臂上的一个摄像机在不同位置采集图像,通过提取视频序列中叶子的特征,对视频序列中的不同图像进行立体匹配,实时对橘子树树冠进行了三维重建。Takahashi等^[40]研制的苹果采摘机器人中,采用两个彩色摄像机组成双目立体视觉系统。当左、右两个摄像机同时获取同一目标的图像后,通过将两幅图像进行中心合成,来对果实目标进行三维重建。Hayashi等^[41]设计的草莓采摘机器人视觉系统,由并排的3个彩色摄像机和LED光源构成,其中两边的两个摄像机构成双目立体视觉系统进行果实三维重建,中间的摄像机用来确定果柄的位置,为避免外界光源影响,采摘试验在夜间进行。Naoshi Kondo等^[42]在2005年研制出的草莓采摘机器人,其视觉系统安装在其行走车辆上。该视觉系统由3个彩色摄像机和4个带有偏振滤光片的照明设备组成。其中2个彩色摄像机组成双目视觉系统用于果实的三维重建,第3个摄像机安装在操作臂的末端,用来探测果实的果梗信息。

在利用双目立体视觉技术进行目标三维重建时,非常困难的一点是左右图像中对应的像素匹配问题,尤其是果实有邻接的情况。为解决此问题,Tarrío等^[43]在利用2个CCD摄像机进行目标三维重建时,辅助1个激光二极管阵列装置。对于难以处理的邻接果实图像分割,该研究采用激光二极管将光斑阵列投射到果实上,根据光斑的位置进行立体匹配,并进行果实的三维重建。

国内方面,殷小舟等^[44]利用双目立体视觉技术三维重建了非洲菊的花卉,较好地还原了图片中花卉的本来面目。为精确测量和分析植物的形态特征参数,杨亮等^[45]、王传宇等^[46]分别在室内环境下利用双目立体视觉技术对玉米叶片进行了三维重建。宋健等^[47]将1台数字摄像机安装于机械手上,利用单摄像机进行茄子果实的三维重建,即使用单摄像头在距离一定的2个位置获得2幅图像,根据图像特征的差值实现了对茄子果实的三维重建。袁挺等^[48]采用2台高感光度黑白摄像机构成立体摄像机,并在摄像机镜头前安装带通干涉滤光片,获取敏感波段的黄瓜近红外图像,通过建立基于灰度相关与极线几何相结合的策略实现了黄瓜抓取点的立体匹配和三维重建。

2.2 基于深度摄像机的作物三维重建

深度摄像机是近年来研制成功的一种测量物体

距离信息的新型设备。它不需要任何扫描机制就能以“高帧速”捕获场景中的三维信息,同时获得配准好的多源图像,并具有紧凑型设计、质量轻、能耗低等优点,被广泛应用于许多研究领域。

按照其工作原理的不同,深度摄像机可划分为2类:一是基于光编码技术的摄像机,其主要特点是红外线发射器连续发射已知的红外激光到场景中,通过另外1个红外CMOS成像器捕获光信号,通过模式光的变形最终确定深度信息。二是基于飞行时间测量原理(ToF)的摄像机,在测量飞行时间时主要采用2种技术:一种是直接ToF测量法,采用高精度计时装置直接测量发射光脉冲的飞行时间,结合光速得到光源与被测物之间的距离;另外一种为相位测量法,由光源发射进行幅度调制的光信号,通过测量参考光信号与反射光信号的相位差,结合一定的鉴相技术,推算出距离信息。两者的不同主要是前者的最大测量值远大于后者^[49]。

Chéné等^[50]利用低成本的深度摄像机拍摄多种植物的冠层深度图像,提出了一种植物深度图像叶子的分割算法,并对植物冠层进行了三维重建。Adhikari等^[51]采用型号为CamCube3.0的摄像机对果园环境中处于休眠期的苹果树进行三维重建,该深度摄像机除了具备上述共性特点之外,还集成了一种抑制背景光技术,使其同样适用于室外环境,为智能剪枝奠定了基础,并尝试将ToF摄像机用于非结构环境的建模。国内冯娟等^[52]和周薇等^[53]提出了利用深度摄像机对果树的冠层三维重建的配准算法。

3 基于扫描方式的作物三维重建

一些设备能够测量一点或一条线的位置信息,通过一些设计使其扫描整个植物,则可以得到冠层的整体三维位置信息。基于扫描方式的作物三维重建,主要有基于位置传感器(PSD)的三维重建和基于激光扫描仪的三维重建。

3.1 基于位置传感器的作物三维重建

位置传感器PSD(Position sensitive detectors)能够根据光照射位置不同而输出不同的电信号。将其与激光发生装置结合,多位学者开发了不同的作物三维扫描装置。

Tanigaki等^[54]利用研制的激光三维视觉系统对树上的浆果进行检测。该系统的特点是将相互垂直的红光和红外光经冷镜后汇聚,以同光轴的方式发射,通过垂直及水平步进电动机带动平面反射镜摆动,实现对目标物表面的扫描,通过PSD感光部件、锁相放大器及滤光片等进行反射信号的接收、处理

与分析。其中红光信号用于探测成熟的红色果实,红外光信号用来测量距离。利用果实表面对激光的镜面反射特点,可将果实与枝干区域加以区分,从而建立果实与枝干的三维模型。

类似地,Lin等^[55]、Tanigaki等^[56]和刘兆祥等^[57]分别根据圣女果、苹果的反射光谱特性,选择两种敏感波长的调制激光作为投射光,利用PSD作为感光部,结合步进电动机驱动技术,构建了三维视觉传感器,获取了樱桃小西红柿和苹果的三维重建模型,利用作物对2束激光的反射差异进行目标识别。Fujiura等^[58]在黄瓜采摘机器人中也采用了三维视觉传感器作为视觉部,对黄瓜果实进行三维重建,不同的是投射光只为一种波长的激光。乔军等^[59-60]在结球菜收获机器人中,采用激光测距仪和多面反光镜相结合的方式获取结球菜的三维模型,利用结球菜的形状进行识别,并通过计算结球菜的结球部位的几何尺寸判断其成熟度。

3.2 基于激光扫描仪的作物三维重建

激光扫描仪是通过发射激光来扫描获取被测物体的距离信息,部分扫描仪可同时得到反射光的强度信息,是一种无接触式主动测量系统,常采用线扫描和面扫描两种基本技术。

方慧等^[4]为了解决配准的三维点云数据精度较低,且配准耗时长、费时费力、配准结果不稳定等问题,设计并制作了一种三维点云数据获取用的基准体,用于确定旋转工作台的中心转轴,解决了较为准确地配准的问题。

Huang等^[61]使用激光扫描仪测量甘蔗表面的粗糙度,获取甘蔗表面的三维信息,通过分析反射光强度的分布结构以区别甘蔗尾和甘蔗干部分。由于甘蔗干表面较为光滑,因此入射光打到表面中心位置时强度信号会出现较大波峰;而甘蔗尾表面比较粗糙,入射光打到表面任何位置出现的漫反射现象会使强度信号趋于平缓。

Lee等^[62]使用激光扫描技术对柑橘树的几何参数进行量化(包括树冠高度、宽度及体积),为早期的产量评估和灌溉喷药提供依据。Grocholsky等^[63]将激光线扫描仪安装于试验车尾部,随其行进中不断垂直扫描葡萄树的轮廓,获取葡萄树的三维模型地图,以此来建立葡萄的冠层密度指数。

Raunonen等^[64]设计了基于激光扫描仪的树木冠层快速自动三维建模方法。根据从不同角度得到的点云数据,快速生成树木的精确三维模型。魏学礼等^[65]从植物三维建模的角度出发,分别应用3种不同类型的激光扫描仪对植物形态结构进行扫描实验,探索在植物数据获取与模型三维重建中应用三

维激光扫描技术的适用性,同时对不同扫描仪的适用场合和技术特性进行了综合分析。

近年来,美国 Polhemus 公司结合电磁技术和激光技术,研制了 FASTSCAN 型激光扫描仪,可以在一次扫描中得到完整的植株三维点云,不存在点云后期配准的问题。但依然存在环境要求高(周围不能存在金属物体)、不能在室外光照情况下应用和扫描植物叶片时易造成数据丢失等问题^[4]。

4 基于三维数字化仪的作物三维重建

根据不同原理研制有多种三维数字化仪,一般涉及 3 个要素:探头、扫描器和数字处理软件。在农林作物三维建模相关研究领域,三维数字化仪已经迅速发展成为一种重要的数据获取途径。该仪器能够快速精确地获取研究对象的三维坐标,并通过配套的软件迅速重建物体的三维模型^[66]。美国 Polhemus 公司的 FASTACK 型三维数字化仪在农林作物三维重建中得到了广泛应用。该仪器能够快速精确地获取测量对象的三维坐标,并通过配套的软件迅速重建物体的三维模型。使用该三维数字化仪时,一般先用探头获得作物枝条的拓扑结构。在用探头按拓扑学顺序获取三维点时,同时记录每个枝条的直径,其值用游标卡尺等测量工具来测量。通过这一过程获得作物枝条三维拓扑重构模型。FASTRACK 电磁式三维数字化仪的原理是基于电磁式定位原理,通过球形磁场发生器发射磁场,位置传感器的移动产生感应电流,电流信号的输出终端即为探头的三维空间位置,从而实现三维模型数字化^[66-67]。

自 20 世纪 90 年代初利用三维数字化仪对作物进行三维重建以来^[68],国外多位学者利用三维数字化仪对不同的作物进行了三维重建:Sinoquet 等^[69]利用 FASTACK 数字化仪结合商业软件 POV-RAY 软件建立了 20 年树龄的核桃树三维模型,此后,多位学者采用类似的方法建立了棉花、葡萄、芒果幼苗、岩生栎幼苗和苹果树的冠层三维模型,并据此进行了光照属性计算^[70-72]。国内方面,马韞韬等^[73]利用数字化仪建立了玉米的三维模型,对玉米叶片的生长规律进行研究。郑邦友等^[74]使用三维数字化仪结合虚拟层切法分析了水稻冠层元素在三维空间的分布状况。王菲等^[66]和章兰芬^[67]利用三维数字化仪,结合 PiafDigit 和 VegeSTAR 软件构建了苹果树三维模型,进而研究了果树 3D 模型和叶面积指数、果实产量的相关性。三维重建的效果图中,树干、枝条的拓扑结构通过三维数字化仪结合 PiafDigit 和 VegeSTAR 软件获取。然后建立苹果树

叶片和枝条的异速生长关系并程序化,利用叶片重构程序产生果实和树叶等^[67]。袁晓敏等^[75]利用三维数字化仪对番茄器官、个体及群体进行三维重建,开发了番茄群体可视化软件,可实现番茄群体三维模型的快速生成。

5 不同三维重建方法的优缺点及趋势展望

5.1 不同三维重建方法的优缺点

基于规则的作物三维重建方法是根据作物的生长规则,通过改变模型参数得到特定作物的多种形态结构。根据不同的规则,开发了不同的软件,可以方便地模拟作物的生长过程。此外,基于规则的方法,不但可以逼真地模拟作物器官、单株作物的三维形态,随着近年相关技术的发展,还可以模拟植物间、植物与环境的相互作用。基于规则方法的局限性主要包括:作物的生长规律比较复杂,所抽象出的规则难以与现实完全一致,三维重建的过程将会由于规则中错误地描述作物架构,造成重建结果有失偏颇,同时不易建立高大植物的规则,有些基于规则的方法不适合模拟高大树木^[3,76]。此外,这些规则仅仅是对目标作物的一种简单刻画,所生成的模型缺乏细节性的描述,而且对于不同种类的作物差异性也不能充分表现出来。有些基于规则的方法在具体编程实现时,语言表示方法复杂,理解和使用困难^[3]。

基于图像的作物三维重建方法可以详细的体现作物的具体细节情况,并且因重建过程不涉及机械运动,重建的速度取决于电子器件的性能及重建算法。随着电子技术的快速发展,该方法具有较大的发展潜力。基于图像的作物三维重建的局限性主要是光照问题,自然条件下不稳定的光照条件限制了基于图像的三维重建的应用。此外,由于大型作物结构复杂,目前还没有合适的算法能对大型的作物进行基于图像的精确三维重建。一些学者在对大型果树进行了基于图像的三维重建,取得了较好的进展,但为了减小难度,主要是对果树的枝干进行三维重建^[77]。基于深度摄像机的作物三维重建可以避免外界光照的干扰,但目前的深度摄像机还存在分辨率较低、扫描范围小等问题。

基于扫描的作物三维重建方式中,利用 PSD 方法并采用主动光源,不受外界光源的影响,具有较高的三维重建精度,但由于涉及机械运动,扫描过程时间较长。基于激光扫描仪的方式对于得到的不同测面点云数据,要再通过后期的去噪和点云配准拼接成完整的植株点云,目前尚存在获取的原始数据量大、数据冗余等缺点。当前首先需要解决的问题是

如何快速地对大量点云数据进行处理,并快速从点云数据中提取出所需要的数据信息和简化模型^[4,9]。

三维数字化仪通过对作物枝干等部位取点测量,结合相应的软件,能够以较高的精度重建作物对象的三维形态结构模型。利用该方法建立的模型真实度较高,被认为是目前描述植物结构较为精确的方法。但是,由于测量过程中比较耗时,因此,单纯利用三维数字化仪对大型作物进行三维重建是不现实的^[76]。

5.2 三维重建方法的发展趋势

基于规则的方法在作物三维重建中的应用比较广泛,相关理论取得了重要进展,但远未成熟。作物生成规则是作物三维重建的关键因素,如何根据植物学知识提取更加符合实际作物的作物生成规则将是今后继续研究的内容。基于规则的作物三维建模的优势是能将作物的形态建模和生理生态建模相结合,动态的展示作物生长的实际情况,如何将形态建模与生理生态建模更紧密结合,也是今后研究的重

点内容之一。

基于图像的三维建模方法因能够快速有效地建立物体的三维模型,已经成为了计算机视觉和计算机图形学领域研究的热点^[79]。由于作物形态的复杂性,目前的研究局限于对枝干、叶片或果实等作物部分进行三维重建,对作物整体进行快速重建,需要在图像获取系统的设计、图像匹配算法和数据拼接等方面取得突破。

各种技术在进行作物三维重建时都具有优点和局限性。对不同的三维重建方法进行综合应用,可以充分发挥不同方法的优势,更快更好地对作物进行三维形态重建,国内外学者对此进行了初步尝试,例如,有研究人员尝试综合利用深度摄像机和彩色相机构成新型的视觉系统,以避免光照影响同时弥补深度摄像机颜色信息缺失的问题。还有学者综合利用三维数字化仪和基于规则的方法,建立了桃树的三维模型,其中枝干形态利用三维数字化仪生成,叶子等其他部分利用规则生成。同时保证了建立作物三维模型的精确性和速度^[76,79]。

参 考 文 献

- 1 王剑. 果树枝干三维重建关键技术研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
Wang Jian. Research on key technologies for 3D reconstruction of fruit tree's stems[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese)
- 2 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)
- 3 郭俊,牛铮. 植被三维建模及应用进展[J]. 计算机工程与应用,2009,45(10):26-29.
Guo Jun, Niu Zheng. Progress in 3D modeling and visualization of vegetation[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(10): 26-29. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 Raunonen P, Kaasalainen M, Åkerblom M, et al. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data[J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 491-520.
- 6 Han S H, Bauks T F. 3D reconstruction of a citrus canopy[C]//2009 ASAE Annural Meeting, ASABE Paper 097398, 2009.
- 7 He Leiyang, Du Xiaoqiang, Qiu Gaohe, et al. 3D reconstruction of Chinese hickory trees for mechanical harvest[C]//2012 ASAE Annual Meeting, ASABE Paper 12-1340678, 2012.
- 8 Adhikari B, Karkee M. 3D reconstruction of apple trees for mechanical pruning[C]//2011 ASAE Annual Meeting, ASABE Paper 1111613, 2011.
- 9 王菲. 高纺锤形苹果树分形维数及三维数字化建模和 STAR 值的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
Wang Fei. Research on the fractal dimension and three-dimensional digitized modeling and STAR value of 'FUJI' apple trees trained to tall spindle shape[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 10 郭江,肖凯,郭新宇,等. 玉米冠层结构、光分布和光合作用研究综述[J]. 玉米科学,2005,13(2):55-59.
Guo Jiang, Xiao Kai, Guo Xinyu, et al. Review on maize canopy structure, light distributing and canopy photosynthesis[J]. Journal of Maize Science, 2005, 13(2): 55-59. (in Chinese)
- 11 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):145-148.
Zhao Chunjiang, Yang Liang, Guo Xinyu, et al. Corn skeleton reconstruction based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 145-148. (in Chinese)
- 12 胡秀珍. 梨树枝干模型构建与三维实现[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
Hu Xiuzhen. 3D visualization of trunk and branch model of pear tree[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,

2011. (in Chinese)
- 13 Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interaction in development, Part I Part II [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18(3):280-315.
- 14 Szilard A, Quinton R. An interpretation for DOL-systems by computer graphics[J]. *The Science Terrapin*, 1979, 4: 8-13.
- 15 Prusinkiewicz P. Applications of L-systems to computer imagery [C] // *Graph-Grammars and Their Application to Computer Science*, 3rd International Workshop, Berlin Heidelberg: Springer, 1987: 534-548.
- 16 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A, Hanan J. Development models of herbaceous plants for computer imagery purposes [C] // *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. ACM, 1988, 22(4): 141-150.
- 17 Prusinkiewicz P, Hanan J. L-systems; from formalism to programming languages [M] // Rozenberg G, Salomaa A. *Lindenmayer Systems; Impacts on Theoretica Computer Science, Computer Graphics, and Developmental Biology*, 1992: 193-211.
- 18 Prusinkiewicz P, Hammel M, Hanan J, et al. L-systems; from the theory to visual models of plants [C] // *Proceedings of the 2nd CSIRO Symposium on Computational Challenges in Life Sciences*, 1996, 3: 1-32.
- 19 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. *The algorithmic beauty of plants* [M]. New York: Springer, 1990.
- 20 Prusinkiewicz P. A look at the visual modeling of plant using L-system [J]. *Agronomie*, 1999, 19(3-4): 211-224.
- 21 康孟珍. 基于子结构的植物随机结构功能模型 [D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2003.
Kang Mengzhen. Functional and structural stochastic plant modeling based on substructures [D]. Beijing: Chinese Academy of Science Institute of Automation, 2003. (in Chinese)
- 22 Honda H. Description of the form of trees by the parameters of the tree-like body: effects of the branching angle and the branch length on the shape of the tree-like body [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1971, 31(2): 331-338.
- 23 Hackett C. A model of the extension and branching of a semihal root of barley, and its use in studying relations between root dimensions. I. The model [J]. *Australian Journal of Botany*, 1972, 25: 669-679.
- 24 Fournier C, Andrieu B. 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.
- 25 管鹤卿, 廖桂平, 李锦卫. 虚拟植物的研究内容及实现技术综述 [J]. *农业网络信息*, 2006, 21(12): 42-46.
Guan Heqing, Liao Guiping, Li Jinwei. Research content and realizing technique of virtual plant [J]. *Agriculture Network Information*, 2006, 21(12): 42-46. (in Chinese)
- 26 王美丽, 何东健. 基于 L 系统的小麦根系可视化模拟研究 [J]. *农机化研究*, 2008(3): 36-39.
Wang Meili, He Dongjian. Visualized simulation of wheat roots based on L-system [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(3): 36-39. (in Chinese)
- 27 李松阳. 水分与植物生长交互的建模与仿真研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Li Songyang. Modeling and simulation of interaction between water and plant growth [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- 28 De Reffye P, Edelin C, Franeon J, et al. Plant models faithful to botanical structure and development [J]. *Computer Graphics*, 1988, 22(4): 151-158.
- 29 Godin C, Caraglio Y. A multiscale model of plant topological structures [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1998, 191(1): 1-46.
- 30 De Reffye P, Fourcaud T, Blaise F, et al. A functional model of tree growth and tree architecture [J]. *Silva Fennica*, 1997, 31(3): 297-311.
- 31 伍怡. 三维植物器官的几何建模 [D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2001.
Wu Yi. 3D geometric modeling of plant organs [D]. Beijing: Chinese Academy of Science Institute of Automation, 2001. (in Chinese)
- 32 De J M. Basic concepts of computer simulation of plant growth [J]. *Journal of Biosciences*, 1992, 17(3): 275-291.
- 33 Danjon F, Bert D, Godin C, et al. Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod [J]. *Plant and Soil*, 1999, 217(1-2): 49-63.
- 34 赵星, De Reffye P, 熊范纶, 等. 虚拟植物生长的双尺度自动机模型 [J]. *计算机学报*, 2001, 24(6): 608-615.
Zhao Xing, De Reffye P, Xiong Fanlun, et al. Dual-scale automaton model for virtual plant development [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(6): 608-615. (in Chinese)
- 35 蔡文奇. 基于 L 系统的三维树模拟系统的设计与实现 [D]. 汕头: 汕头大学, 2011.
Cai Wenqi. The design and implementation of 3d tree simulate system based on L-system [D]. Shantou: Shantou University, 2011. (in Chinese)
- 36 Yan Hongping, De Reffye P, Leroux J, et al. Study on plant growth behaviors simulated by the functional-structural plant model-Greenlab [C] // 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications, Beijing, 2003: 118-128.
- 37 姚芳. 基于人工生命的小麦根系模型构建与可视化 [D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
Yao Fang. Based on artificial life the construction and visualization on wheat roots model [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009. (in Chinese)
- 38 屈洪春, 朱庆生, 蔡林沁, 等. 基于多尺度分析的虚拟植物分枝结构三维重建 [J]. *系统仿真学报*, 2009, 8(15): 4718-

4721.
Qu Hongchun, Zhu Qingsheng, Cai Linqin, et al. Multiscales analysis-based branching structure 3-D reconstruction for virtual plants[J]. Journal of System Simulation, 2009, 8(15): 4718 - 4721. (in Chinese)
- 39 Monta M, Namba K. Three-dimensional sensing system for agricultural robots [C] // Proceedings of 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003, 2: 1216 - 1221.
- 40 Takahashi T, Zhang S H, Fukuchi H. Measurement of 3-D locations of fruit by binocular stereo vision for apple harvesting in an orchard[C] // 2002 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 021102, 2002.
- 41 Hayashi S, Shigematsu K, Yamamoto S, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160 - 171.
- 42 Naoshi Kondo, Kazunori Ninomiya, Shigehiko Hayashi, et al. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture [C] // 2005 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 053138, 2005.
- 43 Tarrío P, Bernardos A M, Casar J R, et al. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-d stereoscopic vision [C] // Computers in Agriculture and Natural Resources, Proceedings of the 4th World Congress Conference, ASABE Publication No. 701P0606, 2006.
- 44 殷小舟, 淮永建, 黄冬辉. 基于双目立体视觉的花卉三维重建[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 33(3): 91 - 94.
Yin Xiaozhou, Huai Yongjian, Huang Donghui. Flower dimensional reconstruction based on binocular stereo vision [J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2012, 33(3): 91 - 94. (in Chinese)
- 45 杨亮, 郭新宇, 赵春江, 等. 基于立体视觉的玉米叶片形态测量与三维重建[J]. 计算机应用, 2008, 28(10): 2661 - 2663.
Yang Liang, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, et al. Morphology measure and 3D reconstruction of corn leaf based on machine vision [J]. Computer Applications, 2008, 28(10): 2661 - 2663. (in Chinese)
- 46 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)
- 47 宋健, 孙学岩, 张铁中, 等. 开放式茄子采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 143 - 147.
Song Jian, Sun Xueyan, Zhang Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 143 - 147. (in Chinese)
- 48 袁挺, 李伟, 谭豫之, 等. 温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 151 - 155.
Yuan Ting, Li Wei, Tan Yuzhi, et al. Information acquisition for cucumber harvesting robot in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 151 - 155. (in Chinese)
- 49 冯娟. 苹果采摘机器人视觉系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
Feng Juan. The research on vision system for apple harvesting robot [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 50 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.
- 51 Adhikari B, Karkee M. 3D reconstruction of apple trees for mechanical pruning [C] // 2011 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 1111613, 2011.
- 52 冯娟, 刘刚, 王圣伟, 等. 采摘机器人果实识别的多源图像配准[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 197 - 203.
Feng Juan, Liu Gang, Wang Shengwei, et al. Multi-source images registration for harvesting robot to recognize fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 197 - 203. (in Chinese)
- 53 周薇, 冯娟, 刘刚, 等. 苹果采摘机器人中的图像配准技术[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 20 - 26.
Zhou Wei, Feng Juan, Liu Gang, et al. Application of image registration technology in apple harvest robot [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 20 - 26. (in Chinese)
- 54 Tanigaki K, Fujiura T, Akase A, et al. Cherry-harvesting robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65 - 72.
- 55 Lin Tingxi, Mayuko Kawasaki, Tateshi Fujiura, et al. Robot for cherry tomato production [C] // Preprints of 3rd IFAC International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems, Sapporo Japan, 2006: 260 - 265.
- 56 Tanigaki K N, Fujiura T S, Akase A R, et al. Cherry harvesting robot [C] // Bio-robotics III, 3rd IFAC International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems, Sapporo, Japan, 2006: 254 - 259.
- 57 刘兆祥, 刘刚, 乔军. 苹果采摘机器人三维视觉传感器设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 171 - 175.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Qiao Jun. Development of a 3-dimension vision sensor in apple harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 171 - 175. (in Chinese)
- 58 Fujiura T, Ueda K, Hyun Ch S. Vision system for cucumber-harvesting robot [J]. IFAC Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bio-Production Systems, 2000: 61 - 65.
- 59 Qiao Jun, Dohi Makoto, Fujiura Tateshi. Image recognition of three-dimensional shape of lettuce [J]. Japan Society of Agricultural Machinery Kansai Branch Journal, 1998(4): 56 - 59. (in Japanese)
- 60 乔军. 遗传算法在图象处理中的应用[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(4): 80 - 82.

- Qiao Jun. Application of genetic algorithm for image proceeding[J]. Journal of China Agricultural University, 1998,3(4):80-82. (in Chinese)
- 61 Huang L H, Okamoto T, Imou K. Measurement of sugarcane surface roughness using laser[C]//2002 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 026179, 2002.
- 62 Lee K H, Ehsani R. Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2):250-262.
- 63 Grocholsky B, Nuske S, Aasted M, et al. A camera and laser system for automatic vine balance assessment[C]//2011 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 1111651, 2011.
- 64 Raunonen P, Kaasalainen S, Kaasalainen M, et al. Approximation of volume and branch size distribution of trees from laser scanner data[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, 38(5-W12):79-84.
- 65 魏学礼,肖伯祥,郭新宇,等. 三维激光扫描技术在植物扫描中的应用分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20):373-377. Wei Xueli, Xiao Boxiang, Guo Xinyu, et al. Analysis of applications of 3D laser scan technology in plant scanning[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20):373-377. (in Chinese)
- 66 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的评价[J]. 北方园艺, 2012(6):10-13. Wang Fei, Zhang Sheqi, Li Bingzhi, et al. Three-dimensional reconstruction of trees trained to tall spindle shape and assessment of light characteristics[J]. Northern Horticulture, 2012(6):10-13. (in Chinese)
- 67 章兰芬. 苹果树体结构原位数字化及分形特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012. Zhang Lanfen. Research on digitizing in original site and fractal feature of the configuration of apple trees[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 68 Palmer J W, Avery D J, Wertheim S J. Effect of apple tree spacing and summer pruning on leaf area distribution and light interception[J]. Scientia Horticulturae, 1992, 52(4):303-312.
- 69 Sinoquet H, Rivet P. Measurement and visualisation of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitizing device[J]. Trees, 1997, 11(5):265-270.
- 70 Sinoquet H, Thanisawanyangkura S, Mabrouk H, et al. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing[J]. Annals of Botany, 1998, 82(2):203-212.
- 71 Farque L, Sinoquet H, Colin F. Canopy structure and light interception in Quercus petraea seed lings in relation to light regime and plant density[J]. Tree Physiology, 2001, 21:1257-1267.
- 72 Willaume M, Lauri P E, Sinoquet H. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation[J]. Trees, 2004, 18(6):705-713.
- 73 马韞韬,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)
- 74 郑邦友,石利娟,马韞韬,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. Zheng Bangyou, Shi Lijuan, Ma Yuntao, et al. Three-dimensional digitization in situ of rice canopies and virtual stratified-clipping method[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(4):1181-1189. (in Chinese)
- 75 袁晓敏,温维亮,郭新宇,等. 番茄群体冠层形态结构三维模拟——基于实测数据[J]. 农机化研究, 2012(2):172-176. Yuan Xiaomin, Wen Weiliang, Guo Xinyu, et al. 3-Dimensional morphology simulation of tomato canopy—based on measured data [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(2):172-176. (in Chinese)
- 76 Sonohat G, Sinoquet H, Kulandaivelu V, et al. Three-dimensional reconstruction of partially 3D-digitized peach tree canopies [J]. Tree Physiology, 2006, 26(3):337-351.
- 77 刘彦宏,王洪斌,杜威,等. 基于图像的树类物体的三维重建[J]. 计算机学报, 2002, 25(9):930-935. Liu Yanhong, Wang Hongbin, Du Wei, et al. Image based 3D reconstruction of tree-like objects[J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(9):930-935. (in Chinese)
- 78 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):141-144. 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)
- 79 Zhu J J, Wang L, Yang R G, et al. Reliability fusion of time-of-flight depth and stereo geometry for high quality depth maps[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(7):1400-1414.
- 80 蔡健荣,孙海波,李永平,等. 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3):152-156. Cai Jianrong, Sun Haibo, Li Yongping, et al. Fruit trees 3-D information perception and reconstruction based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):152-156. (in Chinese)

- 18 Tanaka H, Ohnishi K, Nishi H, et al. Implementation of bilateral control system based on acceleration control using FPGA for multi-DOF haptic endoscopic surgery robot[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 518 – 627.
- 19 文广. 双向液压伺服遥操作机器人的力觉临场感技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Wen Guang. Research on force tele-presence technology of the bilateral hydraulic servo tele-robot [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 20 巩明德, 田博, 王辉. 基于双向伺服力反馈的电子节气门控制系统[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 1 – 7.
Gong Mingde, Tian Bo, Wang Hui. Electronic throttle control system based on bilateral servo with force feedback[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 1 – 7. (in Chinese)

Bilateral Control Strategy of Steer-by-wire System Using Force Control and Position Deviation Feedback

Zheng Hongyu Wang Xiang Zong Changfu Chen Guoying He Lei

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Since the unnatural road feel reactive torque was created by the variable steering ratio of vehicle steer-by-wire (SBW) system, a dynamic model was established to analyze the structure and dynamic characteristic of SBW system. In order to eliminate the coupling of steering angle and road feel torque, a bilateral control method called steering torque deviation and angle feedback was proposed, which referred to tele-presence technology of teleoperation robot by bilateral control method. The closed loop control strategies were described to guarantee the rapid performance and stability of SBW system by road motor and steering actuator motor. The effectiveness was experimentally verified using an experimental car. The results showed that the control strategies enhanced the tracking accuracy of steering angle and improved the vehicle handling.

Key words: Steer-by-wire Bilateral control strategy Force control and position deviation feedback
Vehicle test

(上接第 46 页)

3D Reconstruction of Agriculture and Forestry Crops

Liu Gang¹ Si Yongsheng² Feng Juan²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: 3D reconstruction of agriculture and forestry crops plays an important role in the studies on the biological characteristics of the crop, canopy light distribution and agricultural robot applications. Structures of crops are complex. Fast and accurate three-dimensional reconstruction of the crop is a challenging task. Crop 3D reconstruction methods have caused extensive concerns in the relevant field of study. This paper reviewed the methods of 3D reconstruction of agriculture and forestry crops. According to the technology and core device used, those methods are divided into four categories, rule-based method, image-based method, scan-based method and method based on 3D digitizer. According to this classification, the hardware of the various methods and applications in agriculture and forestry crop 3D reconstructions were summarized and described and the advantages and disadvantages of different methods were analyzed and compared. Finally, the development trend of the crop reconstruction was discussed.

Key words: Crop 3D reconstruction Review