

虚拟现实环境中的物理模型和仿真及其在农业信息技术中的应用

秦洪¹, 肖伯祥^{1,2,3,4}

1. 纽约州立大学石溪分校计算机科学系, 纽约 11733

2. 北京市农林科学院, 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097

3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097

4. 数字植物北京市重点实验室, 北京 100097

摘要 虚拟现实技术在现代农业信息领域的作用日益凸显,然而当前的农业虚拟现实环境仍然以静态几何模型为主,具有真实物理意义并符合真实环境物理规则的动态模型和交互模式仍然没有普及。基于物理的模型和仿真方法具有机理上的优势,能够在自然环境包括农业生物和农业生产场景的动态建模与真实感交互方面增强虚拟交互的真实感和互动体验的沉浸感。本文阐述了基于物理的建模方法本质和意义,总结了农业虚拟现实环境中的物理建模和仿真的研究进展,分析了基于物理方法在植物形态学、运动学、动力学、生物力学以及环境物理场建模与仿真方面的应用原理和基本方法,并探讨了物理模型和仿真方法在农业虚拟现实乃至农业信息化中的潜在作用和未来的发展趋势。

关键词 虚拟现实;物理模型;仿真;农业信息技术

近20年来,中国农业信息技术的发展取得了举世瞩目的成就,计算机软硬件技术的快速发展为现代农业信息技术提供了有力的支撑,“农业信息化”的概念深入人心,信息技术覆盖到农业的各个细分领域,贯通农业生产、科研、流通、服务各个产业链条,在品种选育、栽培管理等众多应用领域颠覆了传统农业活动的运营模式,极大地提高了自动化、信息化程度,从而提高农业生产效率,优化农业资源配置结构,最终提升中国农业的整体现代化水平^[1-4]。概括地讲,农业信息化是利用信息技术手段对农业生产、科研、流通、服务环

节的数据和信息进行处理和分析,面向生产管理、品种选育、科学研究等典型的应用领域提供量化的依据和数据支撑,进而为农业研究者、生产者、经营者和管理者提供基于数据的自动化控制、管理以及决策等服务^[1-4]。21世纪以来,农业信息技术从早期的作物模型、农业专家系统,发展到基于农业物联网技术的智能农业、数字农业,促进传统经验型农业向现代精准型农业转变,中国农业步入信息化时代。特别是近5年来,伴随着新一代信息技术的兴起,以互联网、大数据、人工智能为代表的新一代信息技术正在为农业信息化技术

收稿日期:2017-11-08;修回日期:2018-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(61532002,61300079);北京市自然科学基金项目(4162028)

作者简介:秦洪,教授,研究方向为计算机图形学、虚拟现实、基于物理的建模,电子邮箱: qin@cs.stonybrook.edu;肖伯祥(通信作者),副研究员,研究方向为计算机图形学、虚拟现实、农业信息,电子邮箱: xiaobx@nercita.org.cn

引用格式:秦洪,肖伯祥. 虚拟现实环境中的物理模型和仿真及其在农业信息技术中的应用[J]. 科技导报, 2018, 36(11): 82-94; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.11.008

的发展带来深刻的变革。

农业信息技术发展的同时,虚拟现实技术在现代农业领域中的应用不断扩展和深入,重要性日益凸显,在农业生产管理、科学计算、专业培训、技术推广、景观设计、虚拟互动、科普教育、游戏娱乐等领域都发挥重要的作用^[5-12],特别是都市型现代农业在向科技创新、技术推广等高端产业层次转变和向休闲娱乐、科普教育等服务职能转变的大背景下,对农业生物三维建模,智能人机交互、虚拟场景整合、仿真与互动等技术产生巨大的现实需求。虚拟现实作为农业信息技术的重要组成部分,不仅发展成为现代农业中的一项相对独立的技术领域,支撑科学计算可视化、虚拟农业、数字农业等典型应用,更为其他农业信息技术的推广传播提供全新的技术手段和平台工具,成为加快农业信息技术转化和传播速度的重要推手,对促进中国当前的农业信息化进一步快速发展具有重要意义^[13-15]。

虚拟现实技术是信息技术的重要组成部分,是计算机应用层面与人直接建立互动的环节,是人机交互和信息传递的重要途径,不仅作为新兴的独立的技术产业快速发展,而且作为新一代智能人机交互的渠道和综合信息处理平台,为传统行业提供新的实验方法手段和信息传递途径^[16-17]。作为虚拟现实环境中重要的建模方法,基于物理的建模和仿真(physics-based modeling and simulation)在场景真实感建模、变形与运动仿真、运动学、动力学、热力学、物理交互、力反馈等方面拥有巨大的优势,因此得到广泛的研究和应用^[18-21]。当前的农业虚拟现实应用仍然以静态的几何模型为主,具有真实物理意义且符合真实环境物理规则的动态模型和交互模式仍然没有普及。基于物理的模型和仿真方法在自然环境包括农业生物和农业生产场景的动态建模与交互的真实感体验方面,具有巨大的提升作用,可以在很大程度上增强虚拟现实环境建模、呈现和交互的真实感效果。本文围绕农业虚拟现实技术及应用需求,综述基于物理的建模和仿真方法在农业虚拟现实环境中的研究进展,并探讨其在农业虚拟现实环境乃至农业信息技术中的潜在作用和未来的发展趋势。

1 虚拟现实技术及其在农业领域的应用

在过去的20年,虚拟现实(virtual reality, VR)技术

的发展已经发生了本质的变化,作为信息技术领域的重要发展方向之一,在工业、医疗、军事、教育、游戏等各个领域都得到了广泛的应用,产生了深远的影响,促使传统行业的运行模式发生重大的转变^[16-17,22-23]。相对而言,虚拟现实技术在农业领域的应用较为滞后,软硬件整合程度和人机交互程度较低。尽管如此,虚拟现实技术作为农业信息技术的重要组成部分,仍然为传统农业的发展带来全新的技术手段,在生产、科研、推广等重要环节起到重要的作用。

1.1 虚拟现实技术发展概况

虚拟现实是以计算机技术为核心,结合相关科学技术,生成在视、听、触感等方面,与一定真实环境范围高度近似的数字化环境,用户借助必要的装备与数字化环境中的对象进行交互作用、相互影响,可以产生亲临真实环境的感受和体验^[16-17]。虚拟现实技术是将数学、计算机、机械、电子等学科所涉及的计算机图形学、多媒体、图像处理与模式识别、智能人机交互、传感器、并行计算、人工智能、人机工程等多项关键技术,与特定的应用领域紧密融合,构建具有特定的目的和功能的沉浸式人机交互环境平台。由于虚拟现实技术具有较强的学科综合性和交叉性,且具有典型的“3I”特征:沉浸感(immersion)、交互性(interaction)和构想性(imagination),已成为科学技术探索过程中除理论研究、科学实验之外的第3种手段^[16-17]。虚拟现实技术的发展与各行业的应用需求紧密相关,在工业、农业、教育、医疗、军事、游戏等行业中,虚拟现实技术都发挥重要的作用,当前虚拟现实技术的发展表现出两大趋势。一方面,虚拟现实技术致力于满足各行业的高端仿真需求,重点在于建立目的明确的定制化、专业化交互系统用于高附加值或高风险的技术训练等工作,如虚拟手术等^[21-23]。另一方面,在物联网和大数据支撑下,新一代VR在建模与绘制方法、交互方式和系统构建方法等方面都提出了更高的需求。近3年来,随着可穿戴式设备的普及,虚拟现实技术的发展呈现出消费级、大众化发展趋势,同时增强现实(augment reality, AR)和混合现实(mixed reality, MR)技术作为虚拟现实的扩展,增强了这类技术向大众应用的传播速度。2016年被广泛认为是虚拟现实技术元年,从2016起,随着Oculus、HTC、Hololens等设备的广泛普及,虚拟现实与增强现实(VR/AR)技术与产品迎来新的迅速发展期^[22]。2016年高盛发布了《VR与AR:解读下一个通用

计算平台》的行业报告,预期虚拟现实与增强现实有潜力成为下一个重大通用计算平台。

1.2 虚拟植物的发展历程

虚拟植物(virtual plant)的研究可以追溯到20世纪60年代,Lindenmayer提出L-系统(L-System)描述植物的形态结构^[24]。此后,植物生长模拟吸引了植物学、农学、计算机科学等诸多领域的研究人员,分别从不同的角度研究和开发了虚拟植物:计算机图形学角度的虚拟植物研究主要关注植物的三维可视化、真实感渲染、大规模景观以及面向虚拟现实、景观设计、游戏娱乐等领域的应用研究^[25-31];在植物学和农业领域,虚拟植物研究目标主要在于植物的生长规律量化、可视化的计算和分析,模拟植物生理生态过程,所建立的模型能够预测不同生长环境条件下植物的某些综合指标,包括作物群体的器官数量、生物量、叶面积指数以及冠层光截获、雨水截获、光合生产潜力、物质利用效率等^[32],为产量评估、品种选育、栽培管理提供辅助的计算分析工具,为农业技术培训、品种推广、农业园区虚拟展示、农业景观设计提供虚拟展示和交互的平台。几十年来,研究人员针对不同领域的应用需求,提出了许多生成可视化植物图形的方法和模型,按照建模方式大体上可以分为基于规则的建模方法、功能-结构的模拟、参数化的建模方法以及基于数据的建模方法等几大类,其中:基于规则的建模包括各种改进的L-系统、函数迭代系统(IFS)、分形等主要从描述植物的生长规则的数学表达式入手,通过将植物的生长过程定义为一系列简化的规则,从而生成植物三维虚拟模型^[33];功能-结构模型建立植物株型结构和主要器官的生理功能及其表观形态之间的关系模型,功能-结构植物模型(functional-structural plant model, FSPM)是一类对植物形态结构、生物量的产生和分配以及两者的内在联系进行建模的植物模型的总称,是在单个器官层次对植物这一复杂系统的建模与仿真^[34];参数化建模方法是将植物器官的几何形状用一系列的参数来描述,从而构建参数化的三维几何图形,进而通过交互式或草图的方式实现对模型形状的编辑和控制^[35-37];三维数字化、三维激光扫描等技术手段的发展和设备的普及,使基于实测数据构建高精度高真实感植物三维模型成为可能,采用扫描的方式能够在很大程度上保持和还原植物器官的细节特征,尤其是在不规则性状和复杂形状的植物器官三维重构方面具有独特的优势^[31,38-39],另一

方面基于图像的植物三维重建也为虚拟植物建模提供了一种普遍的低成本数据获取手段和三维重建方式^[40]。各种建模方法都有自身的优势和局限,各类方法之间的融合互补是主要的发展趋势。

1.3 数字植物的延伸与发展

数字植物(digital plant)的概念^[5,14]作为“虚拟植物”的进一步延伸,不仅在形态学的角度量化描述植物的三维结构、几何形状,构建三维虚拟模型,还将植物体本身可以数字化表示的物理、生理属性与三维虚拟模型进行融合。数字植物是数字农业的基础,是利用数字化方法研究植物,并为植物生命系统和农业生产过程的数字化表达、生长建模、过程模拟、可视化计算分析、协同科研实验、成果共享及集成应用提供信息服务和技术支撑平台。本质上,数字植物仍然需要依托一个具体的三维虚拟植物模型作为基本载体和平台,并以此为核心进行多源、多尺度、多类型的数据融合,面向不同的应用目的,同时整合科学计算、数据分析、互联网服务、虚拟展示等典型应用场景和模式,集成为一个开放式的信息服务和共享平台。因此,数字植物的主要研究对象和研究内容仍然是以植物的数字化、可视化为核心,主要包括:植物及其生长环境三维数据获取、植物形态结构真实感重建、植物结构-功能的并行模拟、多源多尺度数据融合、植物生长建模和可视化、量化辅助计算分析等。近年来,数字植物的发展呈现出两个明显的新趋势:一是随着物联网、传感器技术和新一代互联网平台的发展和完善,使田间生态环境的数据实时、连续、全方位获取成为可能,逐渐形成了以作物为核心,融合作物生长环境实时传感数据,构建作物-环境耦合模型实现量化、可视化计算分析,从而对环境因素的影响作出响应和反馈,为生产管理、品种选育提供数据和模型的支持;二是随着生物信息学的发展和核磁共振成像(MRI)、电子计算机断层扫描(CT)、显微成像等技术产品的不断成熟,使得获取和测量植物组织内部结构的精确三维几何数据成为可能,并成为进行植物内部形态结构测量和分析的有效手段,针对植物内部组织、微观结构的数字化可视化研究逐渐兴起^[14,41]。最后,为支撑面向农业生产、科研、流通、服务等不同环节的需求,数字植物围绕农林植物生命、生产和生态系统的多维信息高效感知、认知和信息传递,重点集成研发:植物多尺度仿真问题、实时虚拟互动体验、VR/AR/MR人机交互、网络环境下异构模型方

法共享、虚拟化科研环境构建、专用仿真平台工具等。

1.4 农业虚拟现实环境面临的主要问题

虚拟现实自身发展的3大科学技术问题类可以归纳为:VR中的建模、VR对象的表现和VR人机交互。建模可以是一个算法、公理系统,也可以是一个有结构的人工计算机输入过程;对象的表现,可以是一个算法、数据变换,也可以是有结构的数据输出流;人机交互是人或外部世界对虚拟环境的控制,是有结构的数据输入流,与交互设备密切相关^[16-17]。随着社会生产力和科学技术的不断发展,各行业对VR技术的需求日益旺盛,人们对VR技术的研究日益重视,VR技术也取得了巨大进展,并逐步成为一个新的科学技术领域。与此同时,虚拟现实在各领域中的应用又体现出鲜明的行业特点。农业在中国有悠久的历史,是中国国民经济基础,结合农业生产、科研、流通、服务等环节的应用需求,农业虚拟现实技术关注的重点主要涉及农业生物(动植物)、生产环境、生产技术以及生产科研活动等几个方面。农业领域虚拟现实环境和虚拟现实应用产品的行业特点,在于需要构建农业生物和生产环境的虚拟场景,并且在其中融合展现生产技术和生产科研活动所依赖的交互行为,对生产主体的交互控制,以及农业生物和生产环境所产生的变化和反馈。因此,从建模、表现和交互3个方面来总结农业虚拟现实环境中所面临的问题^[5,14],包括以下3点。

1) 具有复杂结构的农业动植物的三维建模。农业领域的动植物所涉及的物种、品种名目繁多,外观形态各异,尚没有较为普适的方式来构建农业动植物的生命生理属性特征的数学模型。与工业领域的机械、建筑虚拟建模以及医疗行业的虚拟人建模相比,建模的复杂性和难度更大,也缺乏相对标准化的建模方法体系和工具。

2) 农业生产系统虚拟现实场景构建。农业生产系统为相对开放的复杂系统,通常农作物的长势与产量受遗传、环境、管理等多种因素的影响,如何使农业植物的生理特性和生长过程得以高真实感呈现,突出生理物理属性,展现生命的张力;如何准确模拟环境场的动态变化并采用可视化的方式展现,是农业虚拟现实环境展现所面临的富有挑战性的重要课题。

3) 农业生产场景的可交互性。当前的农业虚拟现实场景大多以人工建模方式构建场景,且以虚拟展示的方式单向传递信息,可交互性仍然较弱,当前面临的

首要交互问题仍然是具有生命属性特征的农业生产元素和环境的全方位视听觉、力触觉的沉浸式交互体验,并且在农业虚拟场景中有针对性地设定交互方式,并辅以相应的交互设备。

2 基于物理的方法在农业虚拟现实环境中的作用

虚拟现实技术在农业中的应用范围逐渐扩大,所起的作用逐渐增强,为现代农业生产、科研、流通和服务提供新的方法技术手段和信息传递方式。然而,现有的农业虚拟现实环境中的模型构建、动态仿真、互动体验等大多并没有相应的物理模型的支撑。而真实的自然环境及动植物在三维形态、运动变化、交互反馈等方面都具备其内在的物理意义和规则,基于物理的建模方法正是在这个角度,通过观察、推理、数据等多种手段探索自然和事物潜在的物理规律,并进一步抽象和简化,建立能够在一定程度上描述内在物理特性的简化模型,从而约束虚拟现实环境中的对象物体的三维形态、运动变化和交互反馈,最终实现基于物理的农业虚拟现实场景建模与仿真。

2.1 基于物理的方法概述

虚拟环境中对象的真实感不仅与外观建模水平有关,更与其运动变形、相互作用时符合物理规律的程度密切相关。在1988年SIGGRAPH会议上,Barzel R和Barr A提出了“基于物理的建模(Physics-based Modeling)”的概念^[42],此后,在VR研究领域引入了越来越多的物理学方法,如流体模型、燃烧现象等,在视觉计算、形态建模、几何处理、三维交互、医学影像、游戏娱乐等领域得到广泛应用,所建立的物理模型也越来越精细、越来越复杂,应用的范围也越来越广泛。基于物理的方法是一种有效模拟目标物体自然运动过程的建模与仿真方法^[18-21,30-31],按照建模目标划分主要包括刚性物体、柔性物体以及自然现象等,这类方法的特点是依据真实世界的物理学规律,基于热力学、动力学、运动学等物理过程建立模型,不仅可以实现模拟过程的物理正确性和高度的可视化真实感效果,同时模型在物理约束下自适应生成演化,避免人工干预。在机械设计、游戏制作、虚拟培训等典型应用领域中,涉及零件、织物、组织器官等刚性物体和柔性物体的模拟均涉及物理建模,具体方法包括质点-弹簧系统(mass-spring)、

有限元法、位置动力学法(position-based dynamics, PBD)^[43]、粒子系统等。

基于物理的方法本质上是构建基本物理现象和物理规则的偏微分方程,进而确定边界条件,再进行变分、能量优化并求解方程,最终得到物理规律约束的动态变化过程^[18-20]。物理模型和方法在计算机图形领域被广泛应用于几何建模、曲面建模、人机交互、模型分割、网格编辑、特征检测与分类、自由变形、动画合成等多种问题求解^[44-66]。

典型的物理模型,如一般意义的Lagrange运动学方程可表示为

$$M\ddot{\mathbf{p}} + D\dot{\mathbf{p}} + K\mathbf{p} = \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\ddot{\mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t^2} \approx (\mathbf{p}^{t+\Delta t} + \mathbf{p}^{t-\Delta t} - 2\mathbf{p}^t) / \Delta t^2 \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} \approx (\mathbf{p}^{t+\Delta t} - \mathbf{p}^{t-\Delta t}) / 2\Delta t \quad (3)$$

式中, $\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}, \ddot{\mathbf{p}}$ 分别表示物理模型中顶点的位置、速度和加速度矢量; $\mathbf{M}$ 为模型质量矩阵; $\mathbf{D}$ 为模型阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为模型刚度矩阵; $\mathbf{f}$ 为模型所受的整体外力。

一般意义的热扩散偏微分方程为^[12]

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = -\Delta u(x, t), & t \in R^+ \\ u(x, 0) = f(x), & x \in M \end{cases} \quad (4)$$

式中, u 为热值, M 为目标物体的流形表面(manifold); f 为流形表面上热分布的初始定义; x 为流形表面点的位置广义定义; t 为时间; Δ 为Laplace-Beltrami算子。

$$\Delta_M \phi_k(x) = -\lambda_k \phi_k(x) \quad (5)$$

式中, λ_k 为第 k 个特征值; $\phi_k(x)$ 为对应的特征向量; t 时刻热核函数和热扩散偏微分方程的基本解法

$$h_t(x, y) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\lambda_k t} \phi_k(x) \phi_k(y) \quad (6)$$

$$u(x, t) = \int_M h_t(x, y) f(y) dy \quad (7)$$

式中, $h_t(x, y)$ 为 t 时刻曲面定义域 x, y 之间的热核函数,边界条件为

$$u_0(x, y) = \delta(x, y) \quad (8)$$

热扩散方程蕴含的物理特性使其在多尺度不规则几何处理方面具有显著的优势,基于尺度驱动的形状表示和边缘加权热核(EHK)的流形上的多尺度各向异性热扩散方法,利用局部几何量构造热场的多尺度特征检测,可以通过对热场和热场的分析检测多尺度特征。这种方法可在多尺度几何特征的三维模型检索、

匹配、处理等问题中发挥很好的作用,在农业虚拟现实环境中的农作物三维数据处理和三维建模中普遍面临数据采集规格、尺度不统一的问题,因而基于物理的方法在不同尺度的植物模型处理方面具有很大的潜力和应用前景^[19]。

2.2 基于物理的植物形态学建模方法

基于物理的虚拟仿真在植物建模领域也得到初步应用^[67-71],主要体现在植物的几何造型、动画合成、植物与环境的互动反馈以及植物器官的萎蔫变形等方面。大多数植物的叶片、花朵、枝干等主要器官的三维形态非常复杂,固然通过基于扫描数据的方法可以构建真实感较高的模型,但通过探索植物器官内在物理属性,并通过简化的物理规则生成三维器官模型,不仅具有较高的效率、广泛的应用范围和较为低廉的成本,还可以为模型提供潜在的物理支撑和约束,从而为后续的动态建模与变形提供直接的支持。针对具有复杂特征植物器官几何建模问题,基于物理约束的参数化建模方法可以构建出复杂的褶皱和自适应细分分形特征的三维几何图形。采用如质点-弹簧一类的物理模型构建约束条件,也能够实现褶皱特征的曲面建模和自动生成,图1为玉米叶片褶皱的物理模型约束方法的建模结果^[71],基于物理模型构建玉米叶片褶皱特征的意义和应用原理在于构建自适应的能量约束模型达到一种平衡状态,模拟现实环境中的植物器官的自然形态,从而避免了通过交互式参数化方法和基于扫描数据建模方法的局限。

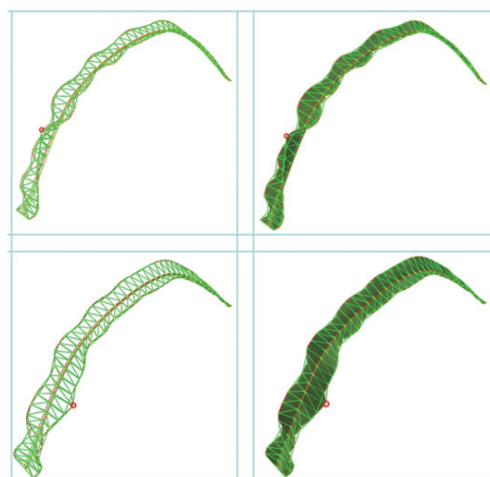


图1 基于物理约束的玉米叶片褶皱建模

Fig. 1 Drape modeling of maize leaf based on physical constrains

为模拟植物叶子老化、枯萎过程中的卷曲变形(由于叶肉与叶脉在失水过程中具有不同的收缩比率而造成),迟小羽等^[68]提出了一种基于生物和物理学的双层模型,以模拟植物器官的变形如卷曲、萎蔫等行为特征。同样是模拟在缺水、高温等条件下植物叶片的萎蔫变形过程,结合植物叶片生理特征和物理特征,唐勇等^[70]采用改进的单层质点-弹簧结构实时模拟了植物叶片萎蔫变形,通过将叶片离散化为叶脉质点、叶缘特征点和普通质点,并设定不同层次的弹簧的收缩强度,以突出叶脉对叶片形变的主导作用,相对于双层模型降低了计算复杂度,从而提高了计算效率。为量化描述植物叶片萎蔫的动态过程,苗腾等^[72]提出一种基于物理模型描述的方法。首先基于植物叶片的三维模型构造体素结构用以抽象植物的细胞结构,在此基础上利用质点弹簧模型表示细胞之间的受力关系,然后根据欧拉-拉格朗日方程描述细胞的运动过程,采用隐式纽马克积分法对方程求解,进而得到细胞的三维位置变化。Wang等^[73]提出一种数学描述模型用以实现基于物理的植物叶片生长过程模拟,把植物叶片中的组织看作一种黏滞的、不可压缩的流体,该流体的二维延展性由非零的生长速率所表现,并改变了Navier-Stokes方程实现生长过程的模拟。Li等^[74]实现了一种基于物理的花朵绽放仿真建模,通过生物学观察发现花瓣的几何形态学特征是一类由边缘曲线支配的弧形过渡,因而构建弹性三角网格在平面内的延展再现花瓣全局弯曲。基于物理的方法在植物形态学建模方面发挥重要作用,并且逐渐与其他建模方法相结合,提高植物形态学几何特征的重建真实感。

2.3 基于物理的运动学和动力学建模

为模拟植物因外力作用而产生的弯曲等变形过程,研究人员从运动学和动力学的角度分析动态变化过程中植物体的受力情况,并构建简化的运动学和动力学模型,将该模型置于物理规则的约束和控制之下,从而基于物理学规则产生变形过程的动态虚拟仿真^[75-82]。在计算机图形的角度,早期的植物动态过程模拟主要针对树木等常见的景观,通过构建弹性物体的力学模型,以及基于经验公式的风速等外力的模型,实现动态过程的运动学和动力学仿真。Akagihe等^[79]提出了一系列用于实现树木在风中摇摆的动态过程的仿真建模技术,使用Navier-Stokes方程构建风场模型,在实现过程中计算量较大。Habel等^[80]提出一种基于物理的

树木在风的作用下实时动态模拟方法,主要思想是整合树木动画过程中的统计观测数据和物理属性,采用了一个简化的Euler-Bernoulli“梁”(Beam)的模型模拟树木枝干,根据经验公式构建风速的湍流模型,基于物理导向实现了包含大量枝干和叶片的树模型的动画合成,该方法的优点在于简捷性和高效率。Pirk等^[81]提出混合树木生长模型和湍流风场的新方法,树木的几何模型由其内在的生长模型函数控制,而其对压力的响应通过一个物理风场模型控制,该模型通过光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)生成。形态复杂的植物运动学和动力学仿真过程中的计算开销通常会很大,因此利用GPU加速的方式也被广泛采用^[82]。

除了采用基于物理过程的经典模型和经验模型之外,质点-弹簧系统(mass-spring system)模型是一种最为普遍的物理模型,由于其构造方程和控制参数简单、便于程序实现、迭代计算量小等优点,被广泛地用于弹性和柔性物体的变形过程建模。该方法的思想是将模拟的目标离散化为一系列具有一定质量的质点(mass),然后根据物体的材料物理属性构造质点之间的弹簧连接(spring),弹簧被假设为遵循胡克定律,具有一定弹性系数;将动态过程在时间轴上离散化为微小的时间步长,通过拉格朗日运动学方程(式(1)~(3))实现运动过程的模拟,整个模拟过程是建立在质点的运动学和力学模型基础上。图2为基于质点-弹簧模型的玉米茎秆和叶片的物理建模和变形过程仿真效果^[76],实现过程的重点在于获取物理模型中质点和弹簧的参数。

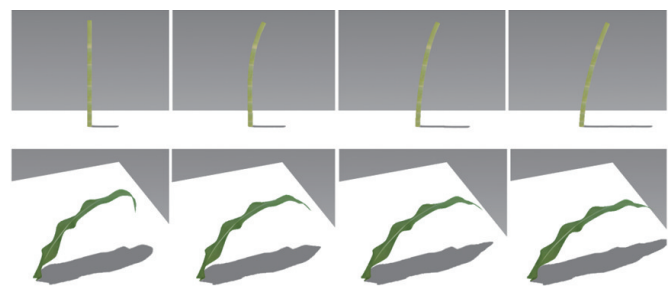


图2 基于物理约束的玉米茎秆和叶片的变形仿真

Fig. 2 Deformation and simulation of maize stem and leaf based on physical constraints

2.4 有限元方法和生物力学建模

有限元法(finite element method, FEM)是一种广泛

应用的具有物理意义的建模方法^[19,83-87],可以对物体力学特性、热扩散特性等物理过程进行定量的计算和模拟。常规意义的物体变形遵循简化的广义胡克定律和拉格朗日运动学方程^[88-91],这是有限元法的理论基础。有限元模型构造的关键步骤是确定物体的材料物理属性,包括弹性模量(杨氏模量)、泊松比、剪切模量等,进而构造刚度矩阵、应力矩阵、应变矩阵,在选定的载荷和约束条件下,构造单元刚度矩阵和总刚度矩阵,最后求解节点位移,并进一步求解应力、应变的分布情况。根据材料的物理属性特征分为线性有限元模型和非线性有限元模型,线性模型的材料属性在变形过程中保持恒定,而非线性模型的材料属性则表现出动态的非线性变化。根据材料特性还可以分为各向同性模型、各向异性模型和横截面异性模型,用以表征材料在不同方向显示出的性质差异。植物器官由于具有特别的生命生理特性,通常为非线性各向异性材料^[91]。有限元法在虚拟现实仿真中的应用较为成熟,在植物变形模拟方面,基于有限元的动态物理仿真也受到计算机图形学领域研究人员的关注,旨在生成具有物理学意义的动态虚拟仿真结果^[88-91]。

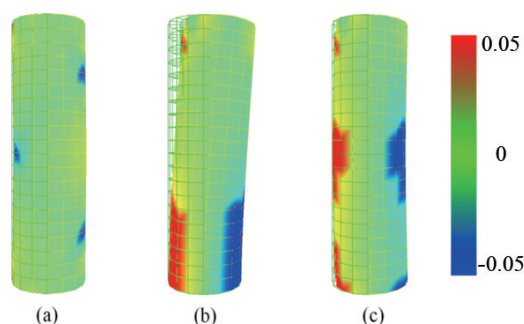


图3 玉米茎秆的有限元建模及其应变分布

Fig. 3 Finit element modeling and strain distribution of maize stem

主要农作物的生物力学计算分析在农业生产中具有重要的现实意义。作物的倒伏是造成产量减少的重要因素,而倒伏通常与茎秆的生物力学属性紧密相关。茎秆的抗弯曲、抗折断性能在力学上的表现指标通常与弹性模量、泊松比、剪切模量以及载荷加载方式、应力破坏阈值等紧密相关。国内外学者针对各种植物的不同器官的生物力学分析与仿真开展了大量的研究工作,为各种作物的力学特性的量化分析提供了依据^[92-93]。图3为基于有限元法的玉米茎秆建模与变

形仿真结果,包括三维变形以及应力分布情况的计算和模拟。传统的农作物倒伏性状研究大多建立在统计模型基础上,从倒伏现象发生的结果和概率展开,而基于有限元的生物力学模型和模拟则提供了物理过程的量化计算分析方法和途径,实现从定性研究向定量研究的转变。因此,作物茎秆生物力学建模和弯曲过程的动态过程模拟为实现倒伏过程的量化数值仿真提供了物理模型基础和有效的计算方法手段。

2.5 农业环境物理场模拟

农作物的产量和品质与生长环境密切相关,例如在花期和灌浆期受冠层中植株的温度、湿度、光照等环境因素的影响非常显著^[94-96],因此农业生产过程中的农田和温室环境的物理场非常重要,而基于物理的方法在环境物理场模拟方面具有机理上的优势。国内外研究人员针对作物冠层光照、温度、湿度的量和分布情况开展了大量研究工作,在典型农作物三维冠层模型的基础上,提出量化的模型研究模拟不同品种和种植方案的作物冠层结构所导致的环境因素的影响。针对光照模拟和量化计算,既有的方法主要包括投影Z-buffer算法、辐射度算法等^[97-98]。算法基本原理是构造自然阳光照射方式,包括太阳直射光、天空散射光和冠层内部的反射和透射;然后将虚拟的植物冠层按照单元形式细分,通过遍历冠层所有组成单元,计算出群体内的光线分布情况,作为群体生成模型的优化程度判定依据。一般情况下,植物群体冠层内的器官分布的优化目标是使冠层光截获量最大,以此对器官的空间分布进行评价,并反馈给器官参数调整环节。针对冠层温度的研究主要关注冠层内不同高度的层以及不同位置的叶片的温度分布趋势,并建立温度变化规律与作物的抗旱性能、水分利用效率的关系及对最终产量的影响^[94-96]。另一方面,温室和大棚是农业生产环境的重要组成部分,针对温室内采光和保温性能的量化建模和计算仿真,传统的方法是基于经验公式进行简化的定性分析^[99]。为了实现更合理、精确的定量分析,基于物理的流体模拟是一种应用较广的有效方法^[16],包括计算流体力学(CFD)^[99-100]、Navier-Stokes方程^[101]、光滑粒子流体动力学(SPH)^[101-106]、有限差分等具体的算法,能够准确量化目标区域内风速场、气体流动趋势、热传输扩散趋势等物理状态,从而提供量化研究方法和仿真计算模型,同时也面临模型选择、参数确定、模型优化、边界条件等诸多特定问题。

传感器和物联网技术的发展,使得构建田间物理场的连续、实时数据采集节点和传感网络成为可能,从而实现在大田和温室中温度、湿度、光照、风速和气体含量等指标的数据获取,为作物-环境耦合模型和环境物理场模拟提供准确全面的原始数据,为物理场模型构建和验证提供数据基础。图4为用于农作物抗倒伏性分析的风洞系统,传统的作物倒伏田间调查研究是在倒伏现象发生后进行的,很难获取倒伏发生时的环境数据,如温湿度、风速、风压、风向和含水量等指标,因而无法有效建立倒伏现象和环境因素的关系模型,而利用人工方式构建的倒伏模拟环境则能够在很大程度上解决这一问题,不仅环境数据便于获取,还可以控制适当的条件实现定量化模拟实验。此外,将环境物理场与农作物植株的运动学、动力学相结合,构建作物-环境耦合作用的流-固耦合(fluid-solid coupling)物理模型,能够建立全方位的田间农业生产环境的定量化模拟模型,在基于物理的仿真过程中实现计算分析,是提高虚拟现实技术在农业生产中的实际意义的有效途径。



图4 农作物抗倒伏模拟分析系统

Fig. 4 Simulation and analysis system for lodging resistance of crops

3 结论

现代农业信息技术的发展需求和虚拟现实技术向新兴领域的扩展趋势,不断推动农业虚拟现实技术向更深应用层次、更高质量标准的方向发展。因此,农业虚拟现实应用场景在建模、呈现和交互环节对精度、质量、效率都提出了更高要求。本文从虚拟现实技术在农业领域的应用发展历程的角度,对当前农业虚拟现实应用中的物理方法和研究进展进行总结,分析物理模型和模拟在农业虚拟场景元素的建模、生命过程的

动态仿真、生物力学计算以及作物-环境物理场模拟等方面的应用原理和潜在作用,并对未来研究方向和应用趋势进行分析和展望。基于物理的模型和模拟方法在提升虚拟现实场景的真实感、沉浸感方面具有机理上的优势,能够更好地解决数字农业虚拟仿真计算分析方面的问题,具有广阔的应用前景。

以互联网、大数据、人工智能等为代表的新一代信息技术的快速发展,将会为现代农业信息技术带来前所未有的变革。与此同时,农业虚拟现实环境的物理建模和仿真将会发生新的变化,未来发展趋势将会在以下几方面体现:1) 适用于农业虚拟现实环境的物理模型的改进、完善以及新模型的探索;2) 农业虚拟现实环境中动植物对象的典型生命、生理特征的物理模型表现形式;3) 农作物-环境交互作用的流-固耦合物理现象和物理过程的建模、计算、仿真与呈现;4) 大数据、人工智能背景下海量农业生产数据的内在物理特征的检测方法和模型;5) 农业虚拟现实环境的人机交互模式,融合支持全方位视听觉、力触觉交互的物理模型的发展等。

参考文献(References)

- [1] 孙九林. 农业信息工程的理论、方法和应用[J]. 中国工程科学, 2000, 2(3): 87-91.
Sun Jiulin. The theory, methodology and application of agricultural information engineering[J]. Engineering Science, 2000, 2(3): 87-91.
- [2] 赵春江. 我国数字农业技术发展战略与主要研究进展[C]//2004年中国作物学会学术年会. 武汉: 中国作物学会, 2004: 7-11.
Zhao Chunjiang. Development and Advances of Digital Agriculture in China[C]//Annual Conference of Crop Science Society of China, Wuhan: The Crop Science Society of China, 2004: 7-11.
- [3] 李保国, 刘忠. 数字农业与农业信息化发展的现状与趋势[C]//2005年中国数字农业与农村信息化学术研究研讨会. 北京: 中国农业出版社, 2005: 14-18.
Li Baoguo, Liu Zhong. Development and trends of digital agriculture and information[C]//Conference on Digital Agriculture and Rural Informatization in China. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 14-18.
- [4] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 等. 农业模型与数字农业发展探讨[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 1181-1188.
Cao Hongxin, Zhao Suolao, Ge Daokuo, et al. Discussion on development of agricultural models and digital agriculture[J]. Ji-

- angsu Journal of Agriculture Science, 2012, 28(5): 1181-1188.
- [5] 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, 2009, 43(10): 2023-2030.
- Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. Exploration of digital plant and its technology system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 43(10): 2023-2030.
- [6] 杨国才. 虚拟农业体系结构的研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(3): 125-126.
- Yang Guocai. Research on architecture of virtual agriculture[J]. Computer Science, 2005, 32(3): 125-126.
- [7] 贾科利, 常庆瑞, 张俊华, 等. 信息农业现状与发展趋势[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2003, 3(6): 13-17.
- Jia Keli, Chang Qingrui, Zhang Junhua, et al. The developmental trend and status of information agriculture[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Social Science Edition), 2003, 3(6): 13-17.
- [8] 周国民. 数字农业综述[J]. 农业图书情报学刊, 2004, 15(3): 5-6, 17.
- Zhou Guomin. Review on digital agriculture[J]. Journal of Library and Information Sciences in Agriculture, 2004, 15(3): 5-6, 17.
- [9] 张卫星, 朱德峰, 赵致, 等. 虚拟现实技术与虚拟农业[J]. 贵州农业科学, 2006, 34(2): 115-118.
- Zhang Weixing, Zhu Defeng, Zhao Zhi, et al. A brief review of virtual reality technology and virtual agriculture[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2006, 34(2): 115-118.
- [10] 毛竞, 关欣, 李巧云. 我国数字农业现状与发展趋势[J]. 广东农业科学, 2007, 12: 126-128.
- Mao Jing, Guan Xin, Li Qiaoyun. Development and trends of digital agriculture in China[J]. Guangdong Agriculture Science, 2007, 12: 126-128.
- [11] 王一鸣. 数字农业与数字农业工程技术的现状与发展[J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊1): 9-10.
- Wang Yiming. Situation and development of digital agriculture and digital agriculture engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(Suppl 1): 9-10.
- [12] 陈洪, 马钦, 朱德海. 基于unity3d的交互式虚拟农业仿真平台研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(3): 184-186.
- Chen Hong, Ma Qin, Zhu Dehai. Research of interactive virtual agriculture simulation platform based on unity3d[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3): 184-186.
- [13] 滕光辉, 周春林. 虚拟现实技术在温室中的应用[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 254-258.
- Teng Guanghui, Zhou Chunlin. Application of virtual reality technology in the greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 254-258.
- [14] 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.
- [15] 肖伯祥, 郭新宇, 陆声链, 等. 植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.
- Xiao Boxiang, Guo Xinyu, Lu Shenglian, et al. Research in technological framework of 3D morphological virtual simulation of plant[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 539-551.
- [16] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学(信息科学), 2009, 39(1): 2-46.
- Zhao Qiping. A survey on virtual reality[J]. Science in China Series F(Information Sciences), 2009, 39(1): 2-46.
- [17] 赵沁平, 周彬, 李甲, 等. 虚拟现实技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 71-75.
- Zhao Qiping, Zhou Bin, Li Jia, et al. A brief survey on virtual reality technology[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 71-75.
- [18] 郭小虎, 秦洪. 适用于可变形体物理建模与模拟的无网格方法[J]. 中国科学(信息科学), 2009, 39(1): 47-60.
- Guo Xiaohu, Qin Hong. Meshless methods for physics-based modeling and simulation of deformable models[J]. Science in China (Information Sciences), 2009, 39(1): 47-60.
- [19] Wang S F, Hou T B, Su Z X, et al. Multi-scale anisotropic heat diffusion based on normal-driven shape representation[J]. The Visual Computer, 2011, 27(6-8): 429-439.
- [20] Pan J J, Zhao C K, Zhao X, et al. Metaballs-based physical modeling and deformation of organs for virtual surgery[J]. The Visual Computer, 2015, 31(6-8): 947-957.
- [21] 谭捷, 杨旭波. 基于物理的流体动画综述[J]. 中国科学(信息科学), 2009, 39(5): 499-514.
- Tan Jie, Yang Xubo. Physically-based fluid animation: A survey[J]. Science in China (Information Sciences), 2009, 39(5): 499-514.
- [22] 张凤军, 戴国忠, 彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(12): 1711-1736.
- Zhang Fengjun, Dai Zhongguo, Peng Xiaolan. Survey on human-computer interaction in virtual reality[J]. Science in China (Information Sciences), 2016, 46(12): 1711-1736.
- [23] 曹焯. 虚拟现实的技术瓶颈[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 94-103.
- Cao Xuan. Technological bottleneck of virtual reality[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(15): 94-103.
- [24] Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interaction

- in development, Parts I and II[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18(3): 280–315.
- [25] Prusinkiewicz P. Modeling of spatial structure and development of plants: A review[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74(1–2): 113–149.
- [26] 李保国, 郭焱. 作物生长的模拟研究[J]. *科技导报*, 1997, 15(7): 11–12.
- Li Baoguo, Guo Yan. Simulated research on the plant growth[J]. *Science & Technology Review*, 1997, 15(7): 11–12.
- [27] 郭焱, 李保国. 虚拟植物的研究进展[J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 273–280.
- Guo Yan, Li Baoguo. New advances in virtual plant research[J]. *Science Bulletin*, 2001, 46(4): 273–280.
- [28] 胡包钢, 赵星, 严红平, 等. 植物生长建模与可视化—回顾与展望[J]. *自动化学报*, 2001, 27(6): 816–835.
- Hu Baogang, Zhao Xing, Yan Hongping, et al. Plant growth modeling and visualization: Review and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(6): 816–835.
- [29] 侯加林, 王一鸣, 董乔雪, 等. 虚拟植物生长的研究现状与发展趋势[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(3): 159–163.
- Hou Jialin, Wang Yiming, Dong Qiaoxue, et al. Research and development of virtual plant technique[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(3): 159–163.
- [30] 戴小鹏, 黄璜. 虚拟现实实验中虚拟植物的建模[J]. *计算机工程*, 2007, 33(23): 215–217, 242.
- Dai Xiaopeng, Huang Huang. Virtual plants modeling in virtual reality lab[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(23): 215–217, 242.
- [31] Rutzinger M, Pratihast A K, Oude Elberink S, et al. Detection and modeling of 3D trees from mobile laser scanning data[C]// *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2010, 520–525.
- [32] Guo Y, Ma Y, Zhan Z, et al. Parameter optimization and field validation of the functional-structural model GREENLAB for maize[J]. *Annals of Botany*, 2006, 97(2): 217–230.
- [33] Boudon F, Pradal C, Cokelaer T, et al. L-Py: An L-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2012, 3(4): 76.
- [34] 康孟珍. 植物功能结构模型研究的回顾与展望[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(10): 2039–2048.
- Kang Mengzhen. Review and perspectives on research about functional-structural plant models[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(10): 2039–2048.
- [35] Xiao B, Guo X, Du X, et al. An interactive digital design system for corn modeling[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2010, 51(11): 1383–1389.
- [36] Xiao B X, Guo X Y, Zhao C J, et al. Interactive animation system for virtual maize dynamic simulation[J]. *IET Software*, 2013, 7(5): 249–257.
- [37] Anastacio F, Prusinkiewicz P, Sousa M C. Sketch-based parameterization of L-systems using Illustration-inspired construction lines[C]// *Sketch Based Interfaces & Modeling, Anecy, France: Eurographics Association* 2008, 33(4): 119–126.
- [38] 马伟, 项波, 查红彬, 等. 基于测量数据的植物建模[J]. *中国科学(信息科学)*, 2009, 39(1): 134–144.
- Ma Wei, Xiang Bo, Zha Hongbin, et al. Modeling plants with sensor data[J]. *Science in China (Information Sciences)*, 2009, 39(1): 134–144.
- [39] Xiao B X, Guo X Y, Zhao C J. An approach of mocap data-driven animation for virtual plant[J]. *IETE Journal of Research*, 2013, 59(3): 258–263.
- [40] Quan L, Tan P, Zeng G, et al. Image-based plant modeling[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 599–604.
- [41] Du J J, Zhang Y, Guo X Y, et al. Micron-scale phenotyping quantification and three-dimensional microstructure reconstruction of vascular bundles within maize stalks based on micro-CT scanning[J]. *Functional Plant Biology*, 2016, 44(1): 10–22.
- [42] Barzel R, Barr A. A modeling system based on dynamic constraints [C]// *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Atlanta, Georgia: ACM New York*, 1988, 22(4): 179–188.
- [43] Müller M, Heidelberger B, Hennix M, et al. Position based dynamics[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, 18(2): 109–117.
- [44] Qin H. Physics-based geometric design[J]. *International Journal of Shape Modeling*, 1996, 2(2–3): 139–188.
- [45] Qin H, Demitri T. D-NURBS: A physics-based geometric design framework[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1996, 2(1): 85–96.
- [46] Qin H. Physics-based modeling framework for graphics, computer-aided design, and visualization[C]// *In Proceedings of International Symposium on Computing and Microelectronics Technologies, Beijing: Peking University Press* 1998: 250–267.
- [47] McDonnell Kevin T, Qin H. Dynamic sculpting and animation of free-form subdivision solids[C]// *In Proceedings of IEEE Computer Animation 2000, Philadelphia: IEEE Computer Society*, 2000: 126–133.
- [48] Du H X, Qin H. Dynamic PDE surfaces with flexible and general geometric constraints[C]// *In Proceedings of the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pa-*

- cific Graphics 2000), Hong Kong: IEEE Computer Society 2000, 213–222.
- [49] Du H X, Qin H. Direct manipulation and interactive sculpting of PDE surfaces[J]. Computer Graphics Forum, 2000, 19(3): C261–C270.
- [50] Zhang M J, Qin H. Hierarchical D–NURBS surfaces and their physics–based sculpting[C]//In Proceedings of International Conference on Shape Modelling and Applications (SMI 2001), Genova: IEEE Computer Society, 2001, 257–266.
- [51] McDonnell Kevin T, Qin H. FEM–based subdivision solids for dynamic and haptic interaction[C]//In Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, Ann Arbor, Michigan: ACM New York, 2001: 312–313.
- [52] Du H X, Qin H. Integrating physics–based modeling with PDE solids for geometric design[C]//In Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2001), Tokyo: IEEE Computer Society, 2001, 198–209.
- [53] Xie H, Qin H. A physics–based framework for subdivision surface design with automatic rules control[C]//In Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2002), Beijing: IEEE Computer Society, 2002: 304–315.
- [54] Du H X, Qin H. Interactive shape design using volumetric implicit PDEs[C]//Proceedings of the 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (SM'03), Seattle, Washington: ACM New York, 2003: 235–246.
- [55] Duan Y, Yang L, Qin H. et al. Shape reconstruction from 3D and 2D data using PDE–based deformable surfaces[C]//Proceedings of The 8th European Conference on Computer Vision (Computer Vision–ECCV 2004), Part III, Prague, Czech Republic: Springer, 2004: 238–251.
- [56] Duan Y, Hua J, Qin H. HapticFlow: PDE–based mesh editing with haptics[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15(3–4): 193–200.
- [57] Du H X, Qin H. Medial axis extraction and shape manipulation of solid objects using parabolic PDEs[C]//Proceedings of The Ninth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (SM 2004), Genova: Eurographics Association, 2004: 25–35.
- [58] Du H X, Yoo T, Qin H. PDE–based medial axis extraction and shape manipulation of arbitrary meshes[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2008, 21(4): 609–625.
- [59] Wang S F, Hou T B, Li Si, et al. Anisotropic elliptic PDEs for feature classification[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(10): 1606–1618.
- [60] Du H X, Qin H. Dynamic PDE–based surface design using geometric and physical constraints[J]. Graphical Models 2005, 67(1): 43–71.
- [61] Bao Y F, Guo X H, Qin H. Physically–based morphing of point–sampled surfaces[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2005, 16(3–4): 509–518.
- [62] Wang S F, Hou T B, Su Z X, et al. Diffusion tensor weighted harmonic fields for feature classification[C]//The 19th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2011) Short Papers Proceedings, Kaohsiung: Eurographics Association, 2011: 93–98.
- [63] Guo X H, Qin Hg. Real–time mesh–free deformation[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2005, 16(3–4): 189–200.
- [64] Guo X H, Li X, Bao Y F, et al. Meshless thin–shell simulation based on global conformal parameterization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(3): 375–385.
- [65] Tan Y H, Hua J, Qin H. Physically based modeling and simulation with dynamic spherical volumetric simplex splines[J]. Computer–Aided Design, 2010, 42(2): 95–108.
- [66] Huang H, Qin H, Yoo S, et al. Physics–based anomaly detection defined on manifold space[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2014, 9(2): 1–39.
- [67] Przemyslaw Prusinkiewicz, Pierre Barbier de Reuille. Constraints of space in plant development[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(8): 2117–2129.
- [68] 迟小羽, 盛斌, 陈彦云, 等. 基于物理的植物叶子形态变化过程仿真造型[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 221–230.
- Chi Xiaoyu, Sheng Bin, Chen Yanyun, et al. Physically based simulation of weathering plant leaves[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2): 221–230.
- [69] 陆声链, 赵春江, 郭新宇, 等. 双层弹簧模型驱动的植物叶片运动模拟[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14): 4383–4386.
- Lu Shenglian, Zhao Chunjiang, Guo Xinyu, et al. Bi–Layered mass–spring model for leaf motions[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4383–4386.
- [70] 唐勇, 曹园园, 陆声链, 等. 三维植物叶片萎蔫变化实时模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(11): 1643–1650.
- Tang Yong, Cao Yuanyuan, Lu Shenglian, et al. The simulation of 3D plant leaves wilting[J]. Journal of Computer–Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(11): 1643–1650.
- [71] 肖伯祥, 吴升, 郭新宇. 基于物理约束的玉米叶片建模方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 待发表.
- Xiao Boxiang, Wu Sheng, Guo Xinyu. Virtual maize leaf modeling based on physical constraints[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, in press.
- [72] 苗腾, 郭新宇, 温维亮, 等. 植物叶片萎蔫过程的物理表示方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 253–258.
- Miao Teng, Guo Xinyu, Wen Weiliang, et al. Physical descrip-

- tion of plant leaf wilting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 253-258.
- [73] Wang I R, Wan J W L, Baranoski G V G. Physically-based simulation of plant leaf growth[J]. Computer Animation & Virtual Worlds, 2004, 15(3-4): 237-244.
- [74] Li Jianfang, Liu Min, Xu Weiwei, et al. Boundary-dominant flower blooming simulation[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2015, 26(3-4): 433-443.
- [75] McDonnell K T, Qin H. A novel framework for physically based sculpting and animation of free-form solids[J]. Visual Computer, 2007, 23(4): 285-296.
- [76] Xiao B X, Qin H. A new data-driven approach to mass-spring simulation of plants[C]//30th International Conference on Computer Animation and Social Agents (CASA 2017), Seoul, South Korea: KAIST School of Computing and Graduate School of Culture Technology, 2017, 65-74.
- [77] Jeongy SoHyeon, Parkz Si Hyung, Kimx Chang Hun. Simulation of morphology changes in drying leaves[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(1): 204-215.
- [78] 王伯维, 周庆敏. 基于物理的植物形变和运动建模[J]. 南京工业大学学报, 2006, 28(2): 92-97.
- Wang Bowei, Zhou Qingmin. Physically based modeling of plant distortion and movement[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2006, 28(2): 92-97.
- [79] Akagi Y, Kitajima K. Computer animation of swaying trees based on physical simulation[J]. Computers & Graphics, 2006, 30(4): 529-539.
- [80] Ralf Habel, Alexander Kusternig, Michael Wimmer. Physically guided animation of trees[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 28(2): 523-532.
- [81] Sören Pirk, Till Niese, Torsten Hädrich, et al. Windy trees: Computing stress response for developmental tree models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(6): 204.
- [82] Yang M, Huang M C, Wu Enhua. Physically-based tree animation and leaf deformation using CUDA in real-time[M]. Transactions on edutainment VI. Springer-Verlag, 2011: 27-39.
- [83] Mandal Chhandomay, Qin H, Vemuri Baba C. A subdivision-based finite element method and its applications[C]//The Sixth SIAM Conference on Geometric Design, Albuquerque, Mexico: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999: 56-57.
- [84] Mandal Chhandomay, Qin H, Vemuri Baba C. A novel fem-based dynamic framework for subdivision surfaces[C]//In Proceedings of Fifth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications (Solid Modeling '99), Ann Arbor, Michigan: ACM New York, 1999: 191-202.
- [85] Qin H. FEM-Based dynamic subdivision splines[C]//In Proceedings of the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2000), Hong Kong: IEEE Computer Society, 2000: 184-191.
- [86] Yang L P, Li S, Hao A M, et al. Realtime two-way coupling of meshless fluids and nonlinear FEM[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(7): 2037-2046.
- [87] Yang C, Li S, Wang L L, et al. Real-time physical deformation and cutting of heterogeneous objects via hybrid coupling of meshless approach and finite element method[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2014, 25(3-4): 423-435.
- [88] Barbic J, Zhao Y. Real-time large-deformation substructuring [J]. Acm Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 1-8.
- [89] Stava O, Kratt J, Said M A M, et al. Plastic trees: Interactive self-adapting botanical tree models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 50.
- [90] Wang B, Wu L H, Yin K K, et al. Deformation capture and modeling of soft objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 94.
- [91] Cai J P, Lin F, Lee Yong Tsui. Modeling and dynamics simulation for deformable objects of orthotropic materials[J]. The Visual Computer, 2016, 32(1): 1-12.
- [92] Dauda S M, Ahmad D, Khalina A, et al. Physical and mechanical properties of kenaf stems at varying moisture contents[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2014, 2(2): 370-374.
- [93] Von Greg Forell, Robertson Daniel, Yang Shien Lee, et al. Preventing lodging in bioenergy crops: A biomechanical analysis of maize stalks suggests a new approach[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(14): 4367-4371.
- [94] Heidi Webber, Pierre Martre, Senthold Asseng, et al. Canopy temperature for simulation of heat stress in irrigated wheat in a semi-arid environment: A multi-model comparison[J]. Field Crops Research, 2017, 202(1): 21-35.
- [95] Webber H, Ewert F, Kimball B A, et al. Simulating canopy temperature for modelling heat stress in cereals[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 77(C): 143-155.
- [96] 刘建军, 肖永贵, 祝芳彬, 等. 不同基因型冬小麦冠层温度与产量性状的关系[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(2): 283-288.
- Liu Jianjun, Xiao Yonggui, Zhu Fangbin, et al. Effect of canopy temperature on yield traits of different genotypes of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(2): 283-288.
- [97] 王锡平, 郭焱, 李保国, 等. 玉米冠层内太阳直接辐射三维空间分布的模拟[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 7-12.
- Wang Xiping, Guo Yan, Li Baoguo, et al. Modelling the three dimensional distribution of direct solar radiation in maize Canopy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 7-12.
- [98] 温维亮, 孟军, 郭新宇, 等. 基于辐射照度的作物冠层光分布计算系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊1): 190-

- 193.
- Wen Weiliang, Meng Jun, Guo Xinyu, et al. Calculation system of light distribution within crop canopy based on radiosity method[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(Suppl 1): 190–193.
- [99] 程秀花. 温室环境因子时空分布 CFD 模型构建及预测分析研究[D]. 镇江: 江苏大学农业装备工程学院, 2011.
- Cheng Xiuhua. Prediction and CFD modeling for greenhouse microclimates temporospatial distributions[D]. Zhenjiang: School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, 2011.
- [100] Bartzanas T, Bochtis D D, Green O, et al. Prediction of quality parameters for biomass silage: A CFD approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93(2): 209–216.
- [101] Chen F B, Wang C B, Xie B Y, et al. Flexible and rapid animation of brittle fracture using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) formulation[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2013, 24(3–4): 215–224.
- [102] Wang C B, Zhang Q, Kong F L, et al. Hybrid particle-grid fluid animation with enhanced details[J]. The Visual Computer, 2013, 29(9): 937–947.
- [103] Wang C, Wang C B, Qin H, et al. Video-based fluid reconstruction and its coupling with sph simulation[J]. The Visual Computer, 2017, 33(9): 1211–1224.
- [104] Akinci N, Ihmsen M, Akinci G, et al. Versatile rigid-fluid coupling for incompressible SPH[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 1–8.
- [105] Yin X, Shen X, Zhang F, et al. Particle-based simulation of fluid-solid coupling[J]. Communications in Computer & Information Science, 2013, 402: 373–378.
- [106] Sun H, Han J. Particle-based realistic simulation of fluid-solid interaction[J]. Computer Animation & Virtual Worlds, 2010, 21(6): 589–595.

Physics-based modeling and simulation in VR and their applications in agricultural information technologies

QIN Hong¹, XIAO Boxiang^{1,2,3,4}

1. Computer Science Department, Stony Brook University, New York 11733, US

2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

4. Beijing Key Lab of Digital Plant, Beijing 100097, China

Abstract Virtual reality has become more important in the field of information technologies of modern agriculture. However, static geometric modeling predominate current VR applications, and dynamic models and interactions of real physical meanings or induced by real world physical rules have yet not been popularized. Because of the advantages by its nature, physics-based models and simulation can promote the reality of natural environment modeling, such as dynamic modeling of animals, plants, production scenes in agriculture, and enhance immersion of interactions in virtual reality. Based on the concept of virtual plant and digital plant, this paper introduces the innate character and significance of the physics-based method. Furthermore, the paper systematically summarizes the research developments of physics-based models and simulations in agricultural virtual reality environment, and analyzes application principles and common algorithms in morphology, kinematics, dynamics, biomechanics and modeling of environmental physical field. Finally, the possible effects and developing trends are discussed.

Keywords virtual reality; physics-based model; simulation; agriculture information technology



(责任编辑 傅雪)