

1-8-2019

Modeling of Wheat Ears Growth Based on Bezier Surface

Junxiao Xue

1. School of Software, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;;

Chenyang Sun

1. School of Software, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;;

Mingliang Xu

2 School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;

Yin Hui

1. School of Software, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling of Wheat Ears Growth Based on Bezier Surface

Abstract

Abstract: Simulation model of wheat growth has important theoretical significance and application value for wheat growth regulation and management. *Study the growth of wheat ears from heading to maturity. We propose an unified modeling method for the grain, lemma and palea of wheat ears based on Bezier surface. Meanwhile, all the models are re-polygonized so that it can be easier to detect the collision.* The method can simulate the growth of wheat ear with relatively high modeling efficiency. Experiment results show that the proposed method has very good modeling effect and the modeling of wheat ear at different growth stages can be achieved.

Keywords

virtual plants, modeling of plants, Bezier surface, stochastic L-system

Authors

Junxiao Xue, Chenyang Sun, Mingliang Xu, Yin Hui, and Haiyu Yu

Recommended Citation

Xue Junxiao, Sun Chenyang, Xu Mingliang, Yin Hui, Yu Haiyu. Modeling of Wheat Ears Growth Based on Bezier Surface[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2475-2481.

基于 Bezier 曲面的麦穗生长建模研究

薛均晓¹, 孙晨阳¹, 徐明亮^{2*}, 殷辉¹, 于海玉¹

(1. 郑州大学软件与应用科技学院, 河南 郑州 450000; 2. 郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 小麦的生长模拟模型对小麦的生长调控与管理有重要的理论意义和应用价值。以小麦麦穗的抽穗到成熟这一阶段的过程作为研究对象, 利用 Bezier 曲面对小麦的麦粒、外稃和内稃进行了统一建模。对小麦麦穗中的麦粒、外稃和内稃模型进行了重新多边形化, 以使其可以更容易检测出麦穗中麦粒的碰撞。该方法可以模拟小麦麦穗的生长过程, 具有较高的建模效率。实验结果表明: 该方法具有较好的建模效果, 能够实现不同生育期的麦穗的建模。

关键词: 虚拟植物; 作物建模; Bezier 曲面; 随机 L-系统

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 07-2475-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807006

Modeling of Wheat Ears Growth Based on Bezier Surface

Xue Junxiao¹, Sun Chenyang¹, Xu Mingliang^{2*}, Yin Hui¹, Yu Haiyu¹

(1. School of Software, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;

2 School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Simulation model of wheat growth has important theoretical significance and application value for wheat growth regulation and management. *Study the growth of wheat ears from heading to maturity. We propose an unified modeling method for the grain, lemma and palea of wheat ears based on Bezier surface. Meanwhile, all the models are re-polygonized so that it can be easier to detect the collision. The method can simulate the growth of wheat ear with relatively high modeling efficiency. Experiment results show that the proposed method has very good modeling effect and the modeling of wheat ear at different growth stages can be achieved.*

Keywords: virtual plants; modeling of plants; Bezier surface; stochastic L-system

引言

近年来, 随着大数据^[1]、虚拟现实^[2]和人工智能^[3]等领域对农作物数字化技术研究的深度融合, 该技术的一个重要分支—农作物建模正逐渐成为直观分析和深入认识农作物复杂生长和发育过程的一种有效技术手段。因此, 采用作物建模技术在农业

数字化平台上构建小麦的生长场景, 并定量分析株高、叶面积指数、冠层变量等小麦种群几何形态生长数据, 可对小麦的生长态势实现可视监测与科学分析, 从而突破时间和空间限制, 在任何时间以任意尺度监测小麦的局部生理生态特性和整体生长发育态势, 为小麦生产过程的科学管理、精准服务和智能决策等提供科学依据。

目前, 玉米和水稻模型是研究较多的虚拟植物模型, 而小麦模型则研究较少。虚拟小麦是虚拟作物的一个研究方向, 对小麦模型进行研究, 大多集中在生长机模型方面, 已有国内外研究者



收稿日期: 2017-08-08 修回日期: 2017-09-25;
基金项目: 国家自然科学基金(61472370, 61672469, 61379079, 61322204, 61502433), 河南省自然科学基金(162300410262), 河南省高等学校重点科研项目(18A413002);
作者简介: 薛均晓(1982-), 男, 河南南阳, 博士, 副教授, 研究方向为几何造型。

<http://www.china-simulation.com>

• 2475 •

研究小麦叶片、茎秆、叶鞘等形态生长特征的模拟。小麦麦穗生长过程的模拟是作物形态建成模拟的重要组成部分之一，但关于小麦麦穗生长的模拟则研究较少。

本文以小麦麦穗为研究对象，在总结前人研究成果的基础上，根据小麦麦穗的生长规律，重点研究小麦麦穗的形态模型构建，以及麦穗的生长过程可视化模拟问题，从而给出小麦麦穗生长的动态仿真结果，并探讨小麦麦穗的实时渲染技术。

1 相关工作

在小麦的生长过程中，其生态、生理特性以及颜色、纹理、几何等三维形态特征，是对其进行生长态势建模的主要科学依据。小麦三维建模技术主要可以归纳为基于生态生理生长机模型的三维重建和基于三维形态模型的三维重建。

(1) 小麦的生态生理生长机模型

小麦的生态生理生长机模型常用数学模型表示，能动态地反映小麦在各个生长阶段的发育状况。该模型由许多具体的生长机模型组成，比如植物土壤、水肥、光合作用、养分生成与分配、呼吸蒸腾作用等，在早期的虚拟小麦研究中，人们侧重于对小麦生态生理的研究，是小麦数字化建模研究的起点。

早在20世纪六、七十年代，Lindenmayer^[4]就通过引进数学模型给出了植物生长建模的第一个真实感方法—L-系统。L-系统通过对植物对象生长过程的经验式概括和抽象，生成字符发展序列以表现植物的拓扑结构，并对产生的字符串进行几何解释，从而生成分形图形。Prusinkiewicz等^[5]对L-系统进行了长期的研究，使L-系统一直在不断完善和发展中，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)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。Peyrat等^[6]开发了基于L-系统和二维广义图的2Gmap L-系统，该系统扩展了L-系统基本的语法，可自动地生成叶片的三角网格表示以及进行纹理映射，能够更好的处理参量、并通过写脚本和具体规则对模型进行控制。Aono等^[7]通过引入吸引子算法，可以模拟风、光、重力等外部条件对不同植物的仿真。Barnsley^[8]提出了分形插值函数，为自然界中连续但不光滑的分形事物提供了新的思维。20世纪末期，出现了比较多的植物生长机模型，有代表性的有Rauscher等^[9]建立了基于光合作用的植物生长过程模型ECOPHYS，Sievanen等^[10]建立了植物碳传输分配模型LIGNUM等。

自动机模型^[11]，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。该方法将植物的生长看作是一个具有一定概率分布的随机过程，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”，并模拟植物的生长发育过程。Godin等^[12]在自动机模型的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。基于自动机模型，法国农业研究发展中心开发了AMAP系统软件^[13]，用于模拟植物生长。AMAP软件在进行植物的动态模拟时，需要利用外界输入的参数变量。

国内学者对植物生长机模型的研究也取得了卓有成效的成果。赵星等^[14]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，提出了基于双尺度自动机模型的枝条弯曲模拟算法。在此基础上，我国和法国的研究人员合作开发了Greenlab系统^[15]，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。朱庆生等^[16]使用隐马尔可夫树分析生长单元的结构特征和信

号之间的转变关系, 对分支结构提出了一种基于多尺度分析的三维重建。

(2) 小麦的三维形态模型

小麦的三维形态模型是采用计算机图形学和计算机视觉等技术在三维空间建立小麦的数字化模型, 以可视化的方式呈现其颜色、纹理、几何等形态结构。该模型可以帮助我们以直观的视角来研究小麦, 揭示小麦复杂的形态结构和生命特性。

Quan 等^[17]提出了基于若干图像模拟植物茎秆的重建方法, 设计了一个可交互的, 人工输入参数较少的自动三维模型建模系统。为了在单幅图像内减少抖动及反射的影响, Zheng 等^[18]通过将模拟背景作为调和函数以提高图像中植物根系片段精度, 能够较好的模拟天然根系的精细形态。在单幅图像研究的基础上, 王传宇等^[19]结合相机内外参数形成投影矩阵, 并通过像素邻域 SSD 值匹配图像像素以获得视差图来重建田块景观, 然后经由“集束调整”优化三维重建结果。Bradley 等^[20]利用少量图像以及经由叶片网格的多次迭代优化从而产生植物密叶的初始模型, 并在重构过程中使用叶片形状数据统计模型对其三维叶片模型进行优化。杨亮等^[21]通过利用机器视觉从图像中获取叶片三维特征点, 用 B 样条曲线拟合构建叶片边缘和主脉, 用 Delaunay 三角化建立叶片的三角化网格模型。

随着传感设备及扫描设备(如激光扫描仪、三维数字化仪等)在农业领域的应用, 能够快速无损地获得植物点云数据, 从而实现了植物三维形态结构的三维重建。Loch 等^[22]使用三维激光扫描仪获取叶片表面大量数据点集, 并利用线性三角法进行植物叶片精确建模。Oqielat 等^[23]基于三维激光扫描仪获取的大量三维点数据, 利用 RBF (radial basis function)建立了高真实性叶片三维模型。孙智慧等^[24]提出了基于点云数据的植物叶片曲面重构方法, 该方法采用 Delaunay 三角化来生成初始网格曲面, 并对其进行优化处理并生成植物叶片的网格曲面。郭浩等^[25]通过体着色三维重

建的方法获取变态根点云数据, 并先将原始点云数据进行噪声、离群点去除及空洞修补, 再提取变态根的构型参数以进行曲面建模。胡令潮^[26]通过对植物形态特征的点云图进行分析处理, 研发了一种能提高植物三维信息长度精度和角度精度的基准体, 并结合可视化类库 VTK 进行植物三维点云的可视化, 能较好地完成对植物叶片三维形态的模拟。

尽管在小麦建模方面已取得很多研究成果, 但由于小麦形态特征的可变性、复杂性以及形态变化动态数据的难获取性, 目前的研究工作一般为静态模型或特定条件下的小麦形态模型, 而模拟生长过程的普适性动态模型则较少。

2 模型描述

2.1 小麦叶片建模

通过对实际小麦叶片的观察和了解, 我们进行叶片建模采用的是几何模型模拟, 我们使用 Bezier 曲面对小麦叶片进行建模。Bezier 曲面和 Bezier 曲线类似, 是 Bezier 曲线的扩展。确定两个方向 U 向和 V 向, 先将所有的 u 向控制点绘出 u 向的 bezier 曲线, 然后在每个 u 向选择的相等的 u 选取 v 向的一系列控制点在绘制 V 向的 bezier 曲线, 将 u 从 0 到 1 递增, 就得到整个 bezier 曲面, 如图 1 所示。

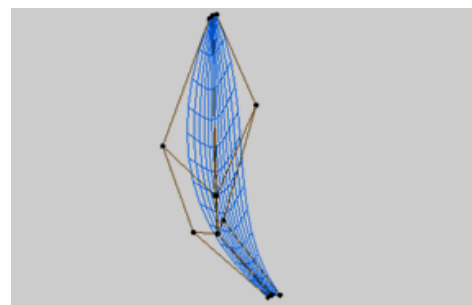


图 1 麦苗的 Bezier 模拟图

Fig. 1 Simulation diagram of barley based on Bezier surface

2.2 小麦麦穗建模

麦穗分为麦粒、麦麸、麦芒, 我们对麦芒使

用广义圆柱体进行建模，对外稃和内稃使用 Bezier 曲面进行建模，如图 2 所示。

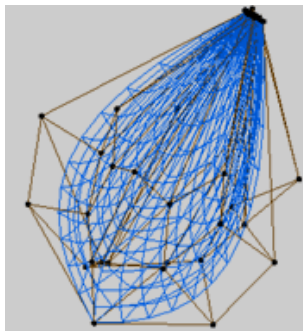


图 2 外稃和内稃作为一体的麦粒 Bezier 图
Fig. 2 Simulation diagram of the lemma and palea as a whole

2.3 重新多边形化

在用 Bezier 曲面建模后，对外稃及内稃模型用 Delaunay 三角剖分，以使得模型在后续的模拟生长的步骤中外稃和内稃的网格拓扑结构不会因为发育而改变。具体划分方法大致如下：

根据图形定义的两个函数(图 3)麦穗中包含许多麦粒，在模拟麦穗发育的过程中，很难保证麦粒间不发生碰撞、重叠。我们利用这两个图形定义的函数，对麦粒进行重新多边形化，使麦粒的曲面多边形化为非退化的三角形。这样做有一些好处：1) 使得麦粒(外稃和内稃)的网格拓扑结构不会因为发育而改变；2) 使得构成麦粒的曲面的点变少，可以减少计算机的计算量、方便加快计算速度；3) 方便使得后续的碰撞检测步骤可以更快的执行。

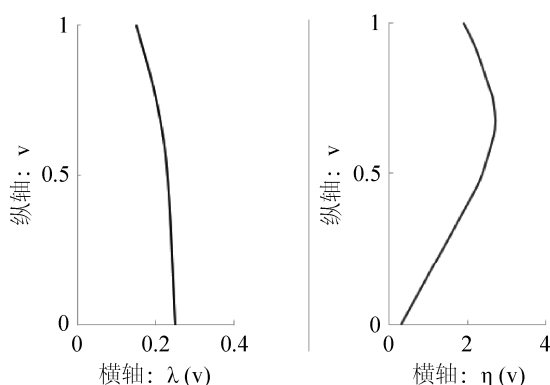


图 3 微调多边形函数
Fig. 3 Function of trim polygon

为了重新多边形分解麦粒的曲面我们采用了半交互方法，使用上述两个图形定义的函数微调多边形(图 3)。第一个函数 $\lambda(v)$ 定义沿 v 轴的顶点序列 $v_0, v_1 \dots v_n$ 之间的间隔。通过求解方程来计算这些顶点之间的距离：

$$\int_{v_i}^{v_{i+1}} \frac{dv}{\lambda(v)} = 1, i = 0, 1, \dots, n-1, \quad (1)$$

在每个区间中根据函数 $\lambda(v)$ 的平均值沿着轴分布点 $[v_i, v_{i+1}]$ ，并保证该分布是鲁棒的(对 λ 的小扰动不敏感)^[8]。第二个函数 $\eta(v)$ 定义了沿着每个等参数线 $v = v_i$ 的参数空间等距的顶点数“ $\eta(v)$ ”。最终的多边形网格就是作为所得到的集合点 (u_i, v) 的 Delaunay 三角剖分。这种三角测量在参数空间中执行，使得网格拓扑不会随着麦粒的发育而改变。

2.4 生长插值

在麦穗进行抽穗、生长的环节对麦穗进行线性插值和球形插值，来模拟麦穗的生长。

计算从 v 方向运行的每个(开放)控制折线的旋转最小化框架，从麦粒(内稃和外稃)底到其尖端(图 4)。在连续线段之间的每个顶点处，该框架围绕垂直于两个段的轴线旋转，使得下一个线段与前一个线段对齐(对于共线段，该旋转为 0)。对相应段的长度进行线性内插，并在相应段之间进行球形内插来在初始和最终姿态中混合相应的控制多边形。该方法可以使得用最少数量的关键姿势来模拟麦穗以及麦粒的发育，通常只有 2 个或 3 个。

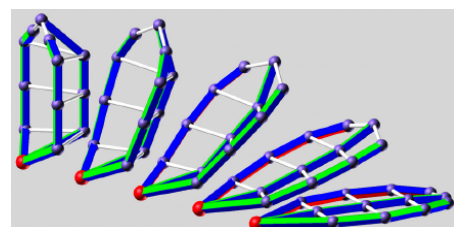


图 4 控制网格插值示例
Fig. 4 Example of control mesh interpolation

2.5 碰撞检测

由于麦穗是一种多麦粒的器官，麦粒互相之间的位置分布也需要有一个约束，不能够相互交

叉、重叠。为了解决这个问题, 我们首先假设麦穗中麦粒的初始分布没有碰撞, 然后在麦穗的发育过程中检测和解决碰撞。为此我们采用连续碰撞检测模式(CCD)。我们先构造轴对齐的边界框(AABB), 然后通过构造轴对齐的边界框来完成。检测交点时, 把边界框少量放大一点, 这样可以减少检测交点时潜在的数值不准确。每个体素中的信息是时间戳的, 以便只有在随后的时间步骤中访问, 才能有效清除过时的体素。我们在表示顶点运动的线段周围创建 AABB, 以方便检测移动顶点是否能与三角形相交。与此 AABB 相交的体素中的所有三角形都处于狭窄阶段。窄阶段的碰撞检测使用了 Provot 的方法, 在给定的时间间隔内, 对代表一个移动点和一个三角形或者两个线段端点的 4 个点进行检测, 看是否共面。

3 实验与讨论

我们使用了加拿大 Calgary 大学基于 L 系统开发出的 CPF, L-Studio, Virtual Laboratory 为仿真型探索性编程和实验提供环境。

模型输入包括麦粒(外稃和内稃)的关键姿势、小麦的叶片模型、定义麦粒多边形的图形定义函数和控制管道的元素的少量参数(每个程序约

5 个)。其中小麦麦粒的关键姿势和叶片模型通过模型编辑器交互式的指定。模型最后由一个 C++ 程序组装, 其实现了可以解决碰撞的麦穗生长发育的模型。我们使用 Blender 做了最终的渲染。

实验对麦粒(外稃和内稃)进行建模, 在 L-Studio 中提供的 surfaces 编辑窗口对麦粒进行曲面建模, 根据麦粒的特点和 Bezier 曲面的性质, 我们使用 Bezier 曲面对麦粒进行的建模。麦粒(外稃和内稃)的初始模型是成熟时麦穗的麦粒, 其中成熟麦粒(外稃和内稃)的 Bezier 曲面控制点为 64 个, 如表 1 所示。

根据对叶片的观察, 根据叶片的特点对叶片用 Bezier 曲面进行建模, 叶片 bezier 曲面控制点为 16 个, 如表 2 所示。

L-Studio 支持 L 系统语法和 C 语言语法, 我们利用 L 系统语言和 C 语言对麦穗的生长进行组合和控制。利用系统中的颜色面板对麦穗模型进行色彩映射。之后, 我们利用定义麦粒多边形的图形定义函数对麦粒进行重新多边形化, 使其成为拓扑结构稳定的 Delaunay 三角剖分。这样的三角剖分重新多边形化一方面可以加快模拟速度, 一方面也使麦粒模型保持了拓扑结构的稳定。

表 1 麦粒(外稃和内稃)的 bezier 曲面控制点
Tab. 1 Bezier control points of grain (lemma and palea)

顶点序列一	顶点序列二	顶点序列三	顶点序列四
45 0 -130.52	45 15 -130.03	37.1 27.28 -128.75	34.14 33.8 -130.27
237.89 -6.81 187.12	59.15 68.63 350	84.12 111.69 84.14	29.68 39.98 -130.27
192.29 4.48 321.14	77.49 63.73 370	56.33 89.12 350	15 44.78 -130.49
0 0 425.76	-0.1 180.82 318.31	11.19 237.57 82.73	0 43.75 -130.87
0 0 425.76	-0.1 180.82 318.31	11.19 237.57 82.73	0 43.75 -130.87
-174.22 3.53 326.78	-81.92 77.83 264.71	-122.83 59.49 174.42	-15 45 -130.77
-218.3 -6.35 187.12	-67.22 120.15 174.42	-149.63 111.69 77.08	-25.56 39.98 -131.63
-45 0 -130.53	-45 15 -130.46	-38.52 24.59 -130.37	-31.4 33.46 -130.95
33.8 -31.74 -130.12	39.98 -25.22 -131.41	45 -15 -130.5	45 0 -130.52
25.91 -38.6 -130.17	91.6 -132.36 85.92	102.88 -64.65 174.42	237.89 -6.81 187.12
15 -45 -130.92	61.97 -104.15 174.42	73.26 -66.06 268.94	192.29 4.48 321.14
0 -46.11 -130.22	-11.99 -218.6 139.15	-2.11 -163.4 309.85	0 0 425.76
0 -46.11 -130.22	-11.99 -218.6 139.15	-2.11 -163.4 309.85	0 0 425.76
-15 -45 -130.47	-59.95 -131.9 171.6	-83.94 -76.88 275.99	-174.22 3.53 326.78
-23.85 -38.26 -130.65	-109.3 -112.15 86.96	-127.67 -64.2 168.78	-218.3 -6.35 187.12
-31.74 -31.74 -130.01	-20.6 -23.51 -120.85	-45 -15 -130.21	-45 0 -130.53

表2 小麦叶片 bezier 曲面控制点

Tab. 2 Bezier control points of the leaf of Wheat

顶点序列一	顶点序列二	顶点序列三	顶点序列四
21.18 5.46 -31.72	16.57 15 8.03	4.04 55.04 4.61	8.71 116.61 -23.76
22.6 5.46 -31.39	22.67 15 1.97	22.67 30 2.14	10.21 116.86 -23.76
23.42 5.46 -31.26	22.53 15 1.8	23.19 30 1.97	10.21 117.19 -23.55
25.28 5.46 -33.23	29.4 15 8.69	46.21 54.09 10.1	11.68 117.18 -23.76

在对小麦麦粒进行多边形化后,通过模型编辑器交互式的指定小麦麦粒的关键姿势,使其可进一步的模拟小麦麦穗的生长,凸显出麦粒在麦穗的成熟过程中的变化。编辑器在这里根据小麦的生长特点对其进行内插和球形插值,内插是因为小麦麦粒的初期和后期的大小不同,球形插值是因为小麦麦穗生长的过程中麦粒会发生角度的变化,所以对小麦麦粒进行球形插值,以使其更具真实感。

我们通过一个 C++程序对模型进行组装,使用 Blender 对模型进行了渲染。相关实验结果(如图 5~8 所示)表明,我们的方法对麦穗的生长建模有效,仿真性高,可以重现小麦的麦穗从抽穗到成熟的过程。

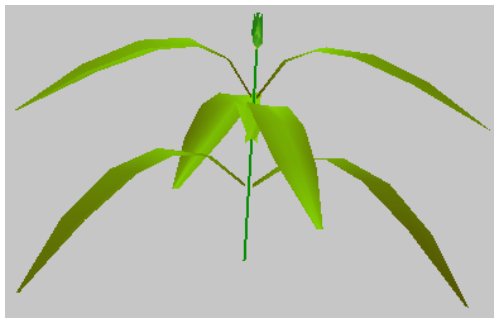


图5 抽穗初期的麦穗

Fig. 5 Wheat ears in early stage



图6 抽穗中的麦穗

Fig.6 Wheat ears in middle stage



图7 成熟的麦穗

Fig.7 Mature ear Wheat



图8 3个不同方向的成熟麦穗

Fig. 8 Three mature wheat leaves in different directions

4 结论

本文从小麦麦穗的生长过程可视化的角度出发,基于小麦麦穗的生长特性对其生长过程进行了虚拟建模。主要工作如下:

1) 使用 Bezier 曲面对麦穗的外稃和内稃进行建模;

2) 利用重多边形化,保证麦粒(外稃和内稃)的网格拓扑结构在生长过程中保持一致性;

3) 解决了小麦麦穗之间的碰撞问题。

相关数值实验说明了本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] 温孚江. 大数据农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Wen Fujiang. Big Data Agriculture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [2] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(1): 2-46.
Zhao Qingping. A Summary of Virtual reality [J]. Chinese Science F: Information Science, 2009, 39 (1): 2-46.
- [3] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning [J]. Nature (S0028-0836), 2015, 521(7553): 436-444.
- [4] Lindenmayer A. Mathematical Models for Cellular Interactions in Development I. Filaments with one-sided inputs[J]. Journal of theoretical biology (S0022-5193), 1968, 18(3): 280-299.
- [5] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The Algorithmic

- Beauty of Plants[M]. New York City: Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] A Peyrat, O Terraz, S Merillou, et al. Generating Vast Varieties of Realistic Leaves with Parametric 2Gmap L-systems. *Visual Computer* (S0178-2789), 2008, 24(7/8/9): 807-816.
- [7] Aono M, Kunii T L. Botanical Tree Image Generation [J]. *IEEE computer graphics and applications* (S0272-1716), 1984, 4(5): 10-34.
- [8] Barnsley M F. *Fractals Everywhere*[M]. CA, San Diego: Academic press, 1988.
- [9] Rauscher H M, Isebrands J G, Host G E, et al. ECOPHYS: An Ecophysiological Growth Process Model for Juvenile Poplar[J]. *Tree Physiology* (S0829-318X), 1990, 7(1/2/3/4): 255-281.
- [10] Perttunen J, Sievänen R, Nikinmaa E. LIGNUM: A Model Combining the Structure and the Functioning of Trees[J]. *Ecological modelling*(S0304-3800), 1998, 108(1): 189-198.
- [11] De Reffye P, Edelin C, Françon J, et al. Plants Models Faithful to Botanical Structure and Development[C]//SIGGRAPH '88 Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1988: 151-158.
- [12] Godin C, Caraglio Y. A Multiscale Model of Plant Topological Structures[J]. *Journal of the oretical biology* (S0022-5193), 1998, 191(1): 1-46.
- [13] Fourcaud T, Blaise F, Barthélémy D, et al. A Functional Model of Tree Growth and Tree Architecture[J]. *Silva Fennica* (S0037-5330), 1997, 31(3): 297-311.
- [14] 赵星, 熊范纶, 胡包钢, 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.
- Xing Zhao, Fanguan Xiong, Baotou Hu, et al. Dual Scale Automaton Model of the Growth of Virtual Plant [J]. *Journal of computer*, 2001, 24(6): 608-615.
- [15] Yan H P, De Reffye P, Leroux J, et al. Study on Plant Growth Behaviors Simulated by the Functional-structural Plant Model-GreenLab[C]//International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and their Applications, 2003: 118-125.
- [16] 屈洪春, 朱庆生, 蔡林沁, 等. 基于多尺度分析的虚拟植物分支结构三维重建[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(15): 4718-4721.
- Qu Hongchun, Zhu Qingsheng, Cai Linqin, et al. 3D Reconstruction of Virtual Plant Branching Structure Based on Multi-scale Analysis [J]. *Journal of system simulation*, 2009, 21(15): 4718-4721.
- [17] Quan L, Tan P, Zeng G, et al. Image-based Plant Modeling [J]. *ACM Transactions on Graphics* (S0730-0301), 2006, 25(3): 599-604.
- [18] Zheng Y, Gu S, Edelsbrunner H, et al. Detailed Reconstruction of 3D Plant Root Shape[C]// 2011 IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 2011: 2026-2033.
- [19] 王传宇, 赵春江, 郭新宇, 等. 基于数码相机的农田景物三维重建[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(33): 266-272.
- Wang Chuanyu, Zhao Chunjiang, Guo Xinyu, et al. 3D Reconstruction of Farmland Scenery Based on Digital Camera [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(33): 266-272.
- [20] Bradley D, Nowrouzezahrai D, Beardsley P. Image-based Reconstruction and Synthesis of Dense Foliage[J]. *ACM Transactions on Graphics* (S0730-0301), 2013, 32(4): 74.
- [21] 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. Journal of Image Morphology in Cucumber Leaves [J]. three dimensional reconstruction based on Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 141-144.
- [22] Loch B, Belward J, Hanan J. Application of Surface Fitting Techniques for the Representation of Leaf Surfaces[C]//International Congress on Modelling and Simulation. MODSIM Press: Melbourne, Australia, 2005: 1272-1278.
- [23] Oqielat M N, Belward J A, Turner I W, et al. A hybrid Clough-Tocher Radial Basis Function Method for Modelling Leaf Surfaces[C]//MODSIM 2007: International Congress on Modelling and Simulation, December. 2007: 400-406.
- [24] 孙智慧, 陆声链, 郭新宇, 等. 基于点云数据的植物叶片曲面重构方法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 184-190.
- Sun Zhihui, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. leaf surface. Surfaces reconstruction of plant leaves based on point cloud data [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3): 184-190.
- [25] 郭浩, 戈振扬, 葛勇, 等. 基于点云的作物地下变态根可视化模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 214-218.
- Guo Hao, Ge Zhenyang, Ge Yong, et al. Visual Simulation of Crop Root Anomalies Based on Point Cloud [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 214-218.
- [26] 胡令潮. 基于 VTK 的植物叶片点云信息处理方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Hu Lingchao. Research on Information Processing Method of Plant Leaf Point Cloud Based on VTK [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.