

植物叶片萎蔫过程的物理表示方法*

苗 腾¹ 郭新宇² 温维亮² 陆声链²

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866;

2. 北京农业信息技术研究中心农业部农业信息技术重点开放实验室, 北京 100097)

摘要: 为量化描述植物叶片萎蔫的动态过程,提出一种基于物理模型的描述方法。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,最后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。以萎蔫状态下叶尖在几何空间的变化轨迹作为参考属性进行数据验证,模拟的叶尖运动方向与实测值相差 19°,实测的叶尖三维空间位置与模拟结果的距离差值在 0.68 cm 至 3.0 cm 之间,数据表明所提算法得到的叶尖变化轨迹与真实叶尖变化轨迹接近;其次,从视觉角度评价,也可逼真地模拟萎蔫状态下叶片三维形态的变化过程。

关键词: 植物叶片 萎蔫过程 计算机模拟 物理建模

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0253-06

引言

叶片萎蔫是植物常见的一种行为特性。当植物体内水势减小,为了降低自身的蒸腾作用,植物叶片会发生一定程度的萎蔫形变(如下垂和卷曲),从而使受光面积和气孔开度减小。有观点认为,这是一种植物的适应性抗旱机制^[1-4]。因此,植物叶片的萎蔫形变过程仿真可以作为研究监控植物环境中水分情况的有效工具。为了对植物叶片的萎蔫形变进行定量分析,萎蔫形变的测量、数学建模和辨别是需要解决的 3 个关键问题。

传统分析萎蔫形变的方法多为手工测量特定的叶片形态参数^[1-2],但这类方法会以外力的形式对叶片形态造成扰动,更有甚者会造成样本的脱落破坏。为此,基于 2D 数字图像的计算机视觉技术^[5-8]被引入萎蔫形态的检测中^[9-10],通过从图像中提取形态参数,使整个测量过程无损、准确,然而从数学意义上看它属于一种函数空间的压缩映射,难以满足估计植物实际的 3D 体态特征的完备条件^[11]。为此,部分研究通过开发激光测距装置获取萎蔫形态的 3D 图像,进而对萎蔫过程进行分析^[11-12]。上述方法均侧重于通过一些典型形态特征参数对植物叶片萎蔫过程进行分析识别,初步对

萎蔫指数的判别实现了量化。

本文侧重于对植物萎蔫形变进行三维建模与可视化仿真,与大多数植物形态三维建模研究^[13-18]不同,并不研究植物叶片静态的形态构成,而是尝试寻找一种通用的物理描述方法,可以对叶片整个面元尺度的动态形变过程进行量化的物理解析,为萎蔫过程的分析、数字化植物设计等提供理论工具。

1 植物叶片的细胞体素建模

植物的萎蔫形变与植物细胞壁内的膨压(即植物活细胞吸水膨胀对细胞壁所产生的压力)有关^[12]。在植物水供给充足时,细胞膨胀、叶片挺立,反之则叶片萎蔫下垂(部分植物叶片会发生卷曲)。

由于细胞的变形导致了叶片萎蔫,可将叶片抽象为细胞个体的组合,这些细胞紧密排列,并相互连接,通过对细胞进行收缩膨胀等控制,进而带动叶片整体在萎蔫时的形变。从三维图形的角度,可利用正六面体体素单元表示细胞,使其按叶片三维空间形态均匀分布并相互连接。为了生成该类结构,可以先计算叶片模型的最小包围盒,然后按照一定的分辨率对包围盒进行分割得到一系列的六面体,最后将六面体与叶片模型进行相交测试,与叶片模型相交的六面体进行保留,其余的全部删除。图 1 为

收稿日期: 2013-07-03 修回日期: 2013-10-08

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD35B01)、北京市自然科学基金资助项目(4122033)和北京市科技计划课题资助项目(Z131100001113035)

作者简介: 苗腾,讲师,主要从事农业信息化技术、数字植物技术研究,E-mail: caumiao@126.com

通讯作者: 陆声链,副研究员,博士,主要从事虚拟现实、数字植物研究,E-mail: lusl@nrcita.org.cn

在同一个黄瓜叶片三维模型上生成的不同密度的正六面体网格。



图 1 不同密度的植物叶片体素网格

Fig. 1 Voxel meshes of plant leaf at different densities
(a) 稀疏体素网格 (b) 密集体素网格

2 叶片萎蔫的物理模型

为了对上述体素结构的运动进行描述,需构建其物理模型。本文选择质点弹簧模型作为基本物理模型,并在生成的体素网格基础上,构造了整个叶片的质点弹簧模型。图 2 为质点弹簧结构,利用六面体单元的 8 个顶点作为质点,任意 2 个顶点相连形成弹簧。对于与六面体边重合的 12 条弹簧本文称为结构弹簧(图 2 中的实线),而对角线相连的 16 条弹簧称为剪切弹簧(图 2 中的虚线)。通过对这些弹簧进行拉伸等外力作用,可以模拟单个细胞(六面体单元)来自纵向以及横向的变形。图 3 为整个叶片模型构成的质点弹簧结构。质点弹簧的主要参数有 3 个:质点质量、弹簧劲度系数及阻尼系数。本文根据叶片的生理属性特征设置物理参数,譬如在叶脉、叶柄的部位设置较大的弹簧劲度系数以及质点质量,而其他位置设置相对较小的劲度系数,这样能够很好地表现叶片叶脉、叶柄相对于叶肉较强的支撑能力。值得注意的是,目前本文还是采用人为经验性地对这些参数进行赋值,即通过人为穷举性地给出各个参数,并将物理模型的结果与实际叶片萎蔫过程进行对比,选择较接近实际数据的数值作为输入参数。质点弹簧模型可采用线性弹性应力,作用于质点*i*,由连接质点*i**j*的弹簧所产生的能量公式为

$$E_i = k_s (|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| - L)^2 \tag{1}$$

式中 *L*——弹簧*i**j*的初始长度
k_s——胡克系数
E_i——在*i*质点上产生的势能
x_i、*x_j*——质点*i**j*的空间坐标

从式(1)中可以看出,形变产生的势能由 2 个质点之间的位移所决定,并且对于一根弹簧上的 2 个质点,其受到的势能相同。

生成质点弹簧之后,叶片每个细胞单元的运动由欧拉-拉格朗日公式描述,该公式为一个二阶的常微分方程

$$\mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{D}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + \mathbf{R}(\mathbf{u}) = \mathbf{f} \tag{2}$$

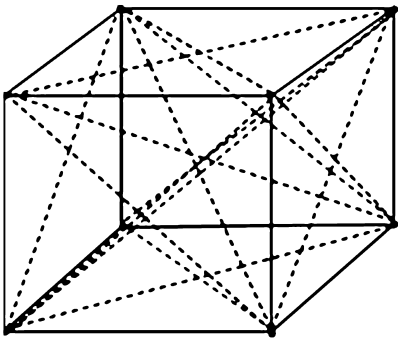


图 2 体素单元的质点弹簧链接方式

Fig. 2 Mass-spring structure of single voxel

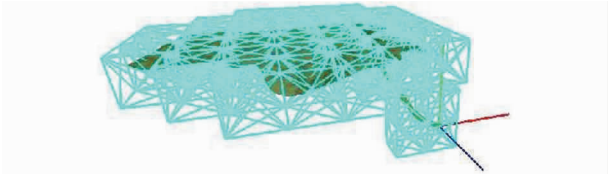


图 3 叶片模型的质点弹簧结构

Fig. 3 Mass-spring structure of the whole plant leaf model

式中 *u*——质点的位移向量, *u* ∈ *R*^{3*n*}
n——质点个数
v——位移*u*的一阶导数,质点速度向量
a——位移*u*的二阶导数,质点加速度向量
M——质点的质量矩阵, *M* ∈ *R*^{3*n* × 3*n*}
本文采用质量塌陷方法将每个质点的质量全部设置在对角线上,所以 *M* 构成一个对角矩阵,除了对角线上的位置外,其余位置全部为 0。*D(u, v)* ∈ *R*^{3*n*}为阻尼力,由质点的位移以及速度所决定;*f* ∈ *R*^{3*n*}为质点的外力,是一个随时间变化的向量。*R(u)* ∈ *R*^{3*n*}为质点的内力,是能量*E*对位移*u*的导函数,并由位移*u*所决定,其计算公式为

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}_i} = k_s (|\mathbf{x}_{ij}| - L) \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|} = k_s \mathbf{u} \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|} \tag{3}$$

本文采用了 Barbic^[19]的方法,利用一个局部瑞利阻尼模型来计算阻尼力

$$\mathbf{D}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = (\alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}(\mathbf{u})) \mathbf{v} \tag{4}$$

其中,α、β为正实数,具有降低变形中高频信息的作用。*K(u)*称为切劲度矩阵,通过对*R(u)*求偏导即可得到,即内力*R(u)*的雅可比矩阵

$$\mathbf{K}(\mathbf{u}) = \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}_j} = k_s \frac{\mathbf{x}_{ji} \mathbf{x}_{ji}^T}{\mathbf{x}_{ji}^T \mathbf{x}_{ji}} + k_s \left(1 - \frac{L}{|\mathbf{x}_{ij}|} \right) \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}_{ji} \mathbf{x}_{ji}^T}{\mathbf{x}_{ji}^T \mathbf{x}_{ji}} \right) \tag{5}$$

为了在大时间步长下保持植物叶片萎蔫形变过程中数值计算的稳定性,可采用隐式纽马克积分法对式(2)进行数值求解。下面给出隐式纽马克积分过程,在这里只对单一时间步长的流程给予介绍。

对于每一时刻,需要给出如下输入参数:在时间步长 s 时刻的位移 $\mathbf{u}_s$ 、速度 $\mathbf{v}_s$ 、步长 $s+1$ 时刻的外力以及时间步长大小 t ,通过以上输入,可计算出 $s+1$ 时刻的位移 $\mathbf{u}_{s+1}$ 及速度 $\mathbf{v}_{s+1}$ 。设牛顿迭代最大次数为 $j_{\max}$ (本文取 1),迭代误差上限 T_{OL} (避免 Newton-Raphson 迭代在获得精确值下仍旧进行计算,虽然当 $j_{\max} = 1$ 时,该误差上限实际上没有作用,但是为了对纽马克积分流程介绍的更加完整,仍然按 $j_{\max} > 1$ 进行叙述),则单一步长的隐式纽马克积分流程如下:

- (1) $\mathbf{u}_{s+1} = \mathbf{u}_s$ 。
- (2) for $j = 1; j < j_{\max}$ // 执行 Newton-Raphson 迭代。
- (3) 估算内力 $\mathbf{R}(\mathbf{u}_{s+1})$, 估算正切劲度矩阵 $\mathbf{K}(\mathbf{u}_{s+1})$ 。
- (4) 计算局部阻尼矩阵 $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \omega \mathbf{K}(\mathbf{u})$ 。
- (5) 计算对称矩阵 $\mathbf{A} = \alpha_1 \mathbf{M} + \alpha_4 \mathbf{C} + \mathbf{K}(\mathbf{u}_{i+1})$ 。
- (6) 计算余项

$$\mathbf{r} = [\alpha_1(\mathbf{u}_{s+1} - \mathbf{u}_s) - \alpha_2 \mathbf{v}_s - \alpha_3 \mathbf{a}_s] \mathbf{M} + \mathbf{C}[\alpha_4(\mathbf{u}_{s+1} - \mathbf{u}_s) + \alpha_5 \mathbf{v}_s + \alpha_6 \mathbf{a}_s] + \mathbf{R}(\mathbf{u}_{s+1}) - \mathbf{f}_{s+1}$$
- 如果余项的平方小于 T_{OL} ,则跳出 Newton-Raphson 迭代,否则,解方程 $\mathbf{A}(\Delta \mathbf{u}_{s+1}) = \mathbf{r}$ 。
- (7) 更新位移、速度、加速度

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{s+1} = \mathbf{u}_s + \Delta \mathbf{u}_{s+1} \\ \mathbf{v}_{s+1} = \alpha_4(\mathbf{u}_{s+1} - \mathbf{u}_s) + \alpha_5 \mathbf{v}_s + \alpha_6 \mathbf{a}_s \\ \mathbf{a}_{s+1} = \alpha_1(\mathbf{u}_{s+1} - \mathbf{u}_s) - \alpha_2 \mathbf{v}_s + \alpha_3 \mathbf{a}_s \end{cases}$$

其中, β 与 γ 在本文算法中分别取 0.25 与 0.5, 参数 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 的计算公式为

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta t^2} \quad \alpha_2 = \frac{1}{\beta t} \quad \alpha_3 = \frac{1-2\beta}{2\beta}$$

$$\alpha_4 = \frac{\gamma}{\beta t} \quad \alpha_5 = 1 - \frac{\gamma}{\beta t} \quad \alpha_6 = 1 - \frac{\gamma}{2\beta}$$

通过上述积分运算,可以得到质点弹簧中每个质点的空间位移,只需将位移累加到初始的质点位置,即可获得变形之后的质点空间坐标。由于每个质点的位置即是体素网格顶点的位置,这样质点弹簧模型的变形过程实际上驱动着整个体素网格的形态变化。可以通过体素网格顶点的空间坐标插值计算出叶子模型各个顶点的三维坐标。本文采用三次插值,可以得到较好的效果。

通过图像可以分析叶片变形的特征(图 4 为实际拍摄黄瓜萎蔫图像),其特点如下:萎蔫初期,叶片不再挺立,而是受重力影响下垂;萎蔫的过程中,叶片边缘首先发生形态变化;通常情况下,轻度失水会造成叶片的迅速萎蔫,而对于叶柄影响不大。叶片萎蔫时,本文认为细胞壁收缩后会带来两类外力:垂直方向的拉力和横向的收缩力。在植物未缺

水时,每个细胞体受到外力的合力为零,而发生萎蔫后,细胞受到横向的收缩力,会导致叶片发生卷曲,而垂直方向的拉力会使叶片发生下垂。如图 5 所示,其中 $M_0 \sim M_7$ 为立方体单元的 8 个顶点,红色箭头表示收缩力,蓝色箭头为拉力。值得注意的是,对于收缩力的大小控制需要非常小心,因为如果施加的力过大,很容易造成弹簧反转,从而造成变形的失真。



图 4 黄瓜叶片萎蔫形态

Fig. 4 Wilting of cucumber leaf

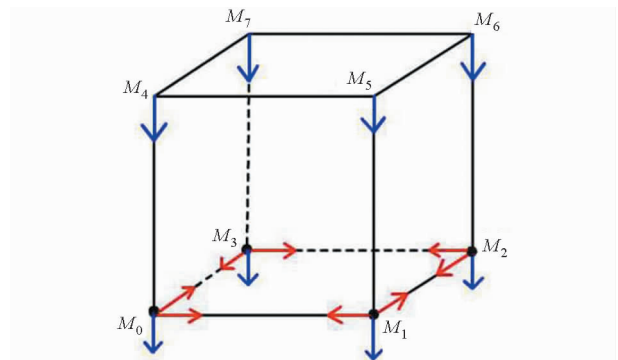


图 5 体素单元受力示意图

Fig. 5 Force diagram of voxel

3 结果与讨论

对萎蔫过程的物理表示方法通过图形化的方式进行编程验证,上述算法在 VC++ 2005 和 OpenGL 图形引擎编程环境下实现,并在配置为 1.96 GHz 的 CPU, DDR 2 GB 内存以及 ATI RHD2400 显卡的 PC 机上进行试验。图 6 为利用本文物理建模方法模拟的如图 4 所示的植物叶片萎蔫效果,图 6a、6b、6c 为萎蔫的过程,图 6d、6e 为不同角度下,变形后细胞体素和叶片模型同时显示的结果,从图中可以看出叶片变形与体素变形之间的联系。一些植物缺水时其叶片的萎蔫表现是边缘向上卷曲,譬如番茄叶片,对于这种情况,需要改变收缩力的作用位置,将收缩力施加在体素上表面的 4 个顶点上即可得到如图 7 中番茄萎蔫的效果。本文算法对叶片的形状没有要

求,即使是分裂样式的叶片仍然适用,图 8 为模拟的西瓜叶片萎焉过程。在计算机图形学领域,文献[20-21]曾经进行过叶片运动的模拟,对于达到图 6 的效果,其给出的运行时间分别为 1~2 h 和 11 min,由于物理表示方法和模型运算的方式不同,本文算法只需 21 s 即可。

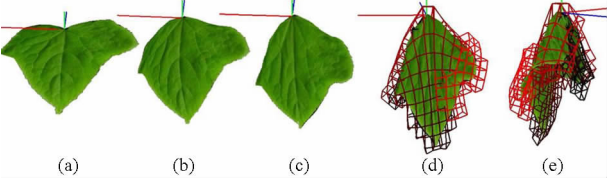


图 6 以图 4 萎焉样式为参考的叶片萎焉效果
Fig. 6 Simulation of leaf wilting such as Fig. 4

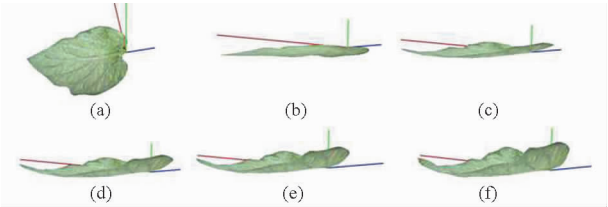


图 7 番茄叶片萎焉过程模拟(边缘向上卷曲)
Fig. 7 Wilting process of tomato leaf

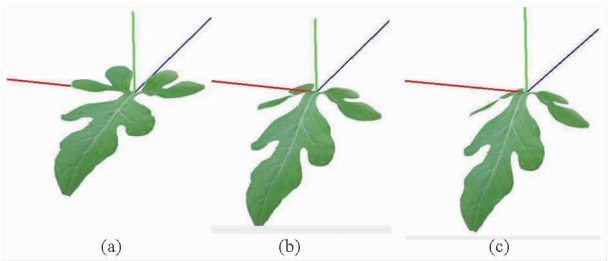


图 8 西瓜叶片萎焉过程模拟
Fig. 8 Wilting process of watermelon leaf

上述内容从视觉角度、算法效率等方面对本文方法进行了阐述,为了定性地对算法进行分析,本文开展了如下试验,从叶片的空间形态结构变化角度对方法进行数据验证。为了观察叶片因完全失水而萎焉的过程,以黄瓜叶片为例进行试验,过程如下:首先从温室栽培的黄瓜植株上摘取一片带叶柄的叶子(叶长、叶宽分别为 20.1 cm 和 22.1 cm),然后马上带回实验室,固定在一个支架上,如图 9a 所示。黄瓜叶片较薄,由于没有了植株的水分供应,叶片迅速萎焉。在形变过程中,利用三维数字化仪设备对黄瓜叶片连续进行了 5 次三维形态的数字化获取(图 9b 所示),并以该数据作为真实数据与本文方法结果(图 10 为本文方法模拟得到的结果)进行对比。利用初始时叶片的三维数字化点作为骨架构建黄瓜叶片的三维模型,并以叶尖点在萎焉过程中的三维空间位置作为对比参数。在试验中发现叶片萎焉的形态变化过程并不是匀速变化的,而是初始时较小,之后逐渐变快,而本文方法在施加力的过程是

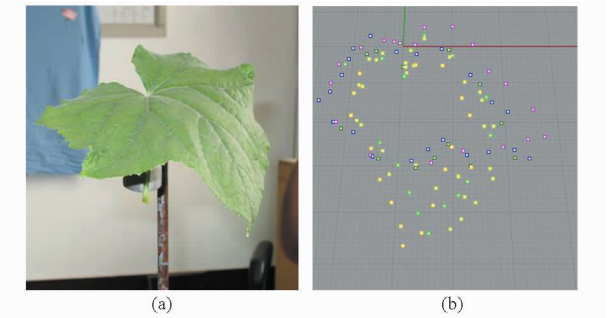


图 9 黄瓜叶片萎焉试验
Fig. 9 Cucumber leaf wilting experiment
(a) 萎焉的黄瓜叶片 (b) 黄瓜叶片萎焉过程的三维数字化点

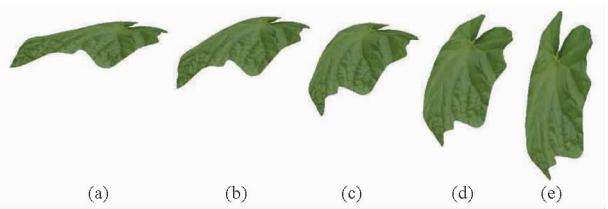


图 10 对应于表 1 中 5 个编号的黄瓜叶片萎焉模拟结果
Fig. 10 Cucumber leaf wilting process corresponding to the table 1
(a) 1 号 (b) 2 号 (c) 3 号 (d) 4 号 (e) 5 号

不变的,所以形态变化基本保持在同一速率。本文方法在叶尖点三维坐标变化趋势上与真实数据是一致的(叶尖下垂),并且通过调整外力参数,可以在特定参数下接近真实的三维坐标(表示模拟的叶尖运动轨迹与实测的叶尖运动轨迹接近)。在选取模拟结果时,依据模拟过程的时间顺序,每隔 0.5 s 记录一个数据(三维坐标及屏幕中模拟结果的图像),在 15 s 内共产生有 1 800 个叶尖三维点的三维坐标,从中选取最接近实测数据的 5 个叶尖三维坐标点,用以对比本文方法与实测数据之间的差别,数据如表 1 所示,其中坐标原点设为叶柄与叶片的结合处,单位为 cm。表中的模拟结果数据是在如下参数设定下得到的:叶脉部分的质点质量、弹簧劲度系数及阻尼系数分别设为 1 000、20 000、500,叶片轮廓部分的 3 个参数分别为 5 000、8 000、500,其他部分的参数为 8 000、10 000、500。

表 1 叶尖三维坐标对比
Tab. 1 Comparison of the 3D coordinates of the leaf tip

形态获取 顺序编号	实测的三维坐标 (x,y,z)/cm	模拟结果的三维坐标 (x,y,z)/cm
1	(0.46, 19.58, -2.13)	(-1.06, 20.41, -1.79)
2	(-1.26, 18.51, -3.43)	(-0.86, 19.03, -3.22)
3	(-1.30, 13.45, -9.87)	(1.12, 12.85, -9.49)
4	(0.10, 8.90, -14.10)	(1.27, 9.90, -15.20)
5	(0.60, 4.20, -18.40)	(1.50, 1.70, -19.60)

对表1中数据进行分析,计算编号1到编号5的叶尖三维变化单位向量(编号5的向量减去编号1的向量,之后再归一化),实测数据为(0.006 253, -0.686 94, -0.726 69),模拟数据为(0.098 621, -0.720 78, -0.686 11),两者之间夹角约为19.1°。各组叶尖三维空间坐标与实测的三维空间坐标的欧式距离差值分别为1.764 908、0.688 84、2.522 063、1.891 798、2.915 476 cm,其中在X方向上的距离差值为1.52、0.4、2.42、1.17、0.9 cm,在Y方向上为0.83、0.52、0.6、1.0、2.5 cm,在Z方向上为0.34、0.21、0.38、1.1、1.2 cm。叶尖运动方向夹角和三维空间位置,可反映出其叶尖在萎蔫变形时的运动轨迹,根据实测数据与模拟数据进行比对,可以看出,两者的运动趋势基本相同,但并不完全吻合,说明本

文采用的物理方法可描述出叶片萎蔫过程的大致规律,但仍存在误差。

4 结束语

提出一种基于物理的叶片萎蔫过程描述方法,以体素网格抽象细胞结构,利用质点弹簧模型表示细胞之间的受力关系,最后采用欧拉-拉格朗日方程计算细胞的运动过程,研究结果表明,叶片的萎蔫形变可以利用物理的方式进行表示,利用物理方式描述有以下几个重要的特点:将萎蔫形变的描述扩展至面元尺度,可计算出叶片各点的三维空间变化;是对萎蔫形变过程的连续、动态的建模;对萎蔫过程的描述不再局限于一个个孤立的数字,而是对现实世界高度还原的三维图形。

参 考 文 献

- 1 金千瑜, 欧阳由男, 禹盛苗, 等. 土壤干旱胁迫对不同水稻品种叶片卷曲的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(4):349 - 354.
Jin Qianyu, Ouyang Younan, Yu Shengmiao, et al. Influence of soil drought stress on leaf rolling index in different rice varieties [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(4): 349 - 354. (in Chinese)
- 2 Turner N C, OToole J C, Cruz R T, et al. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits I. Stress development canopy temperature, leaf rolling and growth[J]. Field Crops Research, 1986, 13: 257 - 271.
- 3 Jongdee B, Fukai S, Cooper M. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice[J]. Field Crops Research, 2002, 76(2 - 3): 153 - 163.
- 4 Lilley J M, Ludlow M M. Expression of osmotic adjustment and dehydration in diverse rice lines[J]. Field Crops Research, 1996, 48(2 - 3): 185 - 197.
- 5 Adamsen F J, Jr. Pinter P J, Barnes E M, et al. Measuring wheat senescence with a digital camera[J]. Crop Science, 1999, 39(6):1719 - 1724.
- 6 Scharf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress nitrogen need[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(3):397 - 404.
- 7 Stevens G, Wrathera A, Rhinea M, et al. Predicting rice yield response to midseason nitrogen with plant area measurements[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(2):387 - 392.
- 8 张彦娥. 基于计算机视觉技术温室作物长势诊断机理与方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
- 9 Revollon P, Chasseriaux G, Riviere L M, et al. The use of image processing for tracking the morphological modification of forsythia following an interruption of watering[C] // Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering, 1998: 872 - 873.
- 10 Carter G A, Miller R L. Early detection of plant stress by digital imaging with narrow stress sensitive wavebands[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(3): 295 - 302.
- 11 张慧娟, 赵燕东, 孙宇瑞, 等. 基于3D图像的植物亏水胁迫萎蔫体态辨识方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1):154 - 158.
Zhang Huijuan, Zhao Yandong, Sun Yurui, et al. Identification of plant morphology wilt-induced by water stress with 3-D based image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):154 - 158. (in Chinese)
- 12 赵燕东, 刘贺, 刘卫平. 基于叶片分形维数的植物亏水胁迫萎蔫体态测量方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):191 - 195.
Zhao Yandong, Liu He, Liu Weiping. Measurement of plant leaf physical configuration under water deficit stress using fractal dimension[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9):191 - 195. (in Chinese)
- 13 Rodkaew Y, Lursinsap C, Fujimoto, et al. Modeling leaf Shapes using L-systems and genetic algorithms[C] // Proceedings of NICOGRAPH2002, 2002: 73 - 78.
- 14 Mündermann L, MacMurchy P, Pivovarov J, et al. Modeling lobed leaves[C] // Proceedings of Computer Graphics International, 2003: 60 - 65.
- 15 Lu S L, Guo X Y, Zhao C J, et al. Shape modeling of organs and structures generating for crops[C] // Proceedings of International Symposium on Crop Modeling and Decision Support, 2008: 99 - 108.
- 16 Loch B, Belward J, Hanan J. Application of surface fitting techniques for the representation of leaf surfaces[C] // Proceedings of

International Congress on Modelling and Simulation. Melbourne: MODSIM Press, 2005:1272 – 1278.

17 Runions A, Fuhrer M, Lane B, et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 702 – 711.

18 陆声链,郭新宇,李长锋. 3 维植物叶片精确建模和绘制技术研究[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 731 – 737.
Lu Shenglian, Guo Xinyu, Li Changfeng, et al. Research on techniques for accurate modeling and rendering 3D plant leaf[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 731 – 737. (in Chinese)

19 Jernej B, Doug J. Real-time subspace integration for St. Venant – Kirchhoff deformable models[J]. ACM Transactions on Graphics (ACM SIGGRAPH, 2005), 2005, 24(3): 982 – 990.

20 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. (in Chinese)

21 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(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(14): 4383 – 4386. (in Chinese)

Physical Description of Plant Leaf Wilting

Miao Teng¹ Guo Xinyu² Wen Weiliang² Lu Shenglian²

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Key Laboratory for Information Technology in Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: This paper presented a physical representation for quantitatively simulating the motion of plant leaves, such as wilting and curling. The wilting motion is associated with the contraction and stretching of the plant cells. Fact-based, our method modeled the physical morphological changes of the plant cells for describing the wilting motion of leaves. Firstly, a voxel mesh constructed based on 3D leaf model was used to simulate the cell structure of plant leaves. Then, the mass-spring structure was applied to express the forces between cells. Finally, The Euler – Lagrange equation was utilized to model the movement process and solved by implicit newmark integration method to get the 3D positions of the voxel mesh. The movement trails of wilted leaf tip in the geometric space were used for data validation. The angular difference between measured motion direction and experimental results was 19°, and the distance between them ranged from 0.68 cm to 3.0 cm. The experimental data show that movement trails of wilted leaf tip that the method simulated is closed to the real wilted leaf; secondly, evaluating this method from the visual aspects, the algorithm also can realistically simulate the deformation process of plant leaf wilting.

Key words: Plant leaf Wilting Computer simulation Physical modeling