

百合鳞茎的生长建模与可视化模拟*

戈振扬 姜利民 于英杰 李鹏 易怀锋 李立成

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 构造了百合鳞片的生长机与可视化模型,并根据鳞片轮生抱合形成鳞茎的生长机理,构建鳞茎生长的可视化模拟系统。鳞片视为向线生长的生长趋势,每生长一小段就向中心茎秆偏转一定角度;鳞片采用四边形图元绘制的双半椭圆台进行可视化建模,其中截面是月牙形,由两个长半轴相等短半轴不相等的半椭圆围合而成。结果表明该系统能形象地模拟百合鳞茎的生长与抱合过程。

关键词: 百合鳞茎 鳞片 生长机 可视化

中图分类号: TP391.9; S644.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0209-06

Growth Modelling and Visualization Simulation of Lily Bulblet

Ge Zhenyang Jiang Limin Yu Yingjie Li Peng Yi Huafeng Li Licheng

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Growth mechanism and visualization model of lily scale was developed. According to growth mechanism of scales whirling and packing, the system of bulblet growth and visualization was constituted. The scales' growth was regarded as linear growth trend, when growing a little elements, the scale deflected a certain angle to center-stem. Scales' visualization model was developed by employing quadrilateral picture element drawing double-semi-elliptical truncated cone. The section drawing of scale was crescent, which was composed of two semi-ellipses of identical semi-major axis and unequal semi-minor axis. The result shows that this system can simulate livingly lily bulblet vegetation process of whirling and packing.

Key words: Lily bulblet Scale Growth mechanism Visualization

引言

近年来,虚拟植物已成为农业信息化领域的研究热点,在植物形态结构建模与可视化方面其理论和技术已取得了一定的成果^[1-3]。目前,关于单个植物器官花朵^[4-7]、果实^[8-12]的几何建模与真实感绘制已有一定的研究成果;对于地下器官的建模仿真也有一定研究,如有学者对地下组织变态根土豆和胡萝卜做了相关的研究^[13]。但是这些研究主要都是植物器官各个阶段的静态结构模型的建立与可视化,很少涉及动态连续生长过程中的拓扑结构和几何形态变化的研究。

百合(*Lilium spp.*)的地下组织包括根系和鳞

茎,其根系有茎出根(上盘根)和底出根(下盘根)。鳞茎是百合所独有的一种特殊的变态茎器官,它由许多鳞片按一定规律生长抱合而成,鳞片是花朵的瓣状结构,形状为凹体,不是一般果实的凸体形状。本文针对百合鳞茎的特殊结构,研究鳞茎生长发育过程中的三维空间造型与分布,根据鳞片形成鳞茎的生长规律实现鳞茎的生长建模与可视化模拟^[14-15]。

1 鳞茎的生长机与可视化模型

小鳞茎(种球)的形成是由优良的鳞片插扦或组织培养经过细胞分化而形成的,生长在母体鳞片近轴面基部,由小鳞片原基两端生长成对生的新鳞

片,继续分化出多片后,数片鳞片抱合而成为小鳞茎,小鳞茎栽入大田一段时间后按上述规律继续分化生长成鳞茎。如图 1 所示。因此,鳞茎的生长机与可视化建模主要集中在单片凹体鳞片的建模上,再按照一定的规律轮生抱合以实现鳞茎的生长与可视化。



图 1 百合地下组织的形态结构

Fig. 1 Morphological structure of lily's underground organ

1.1 鳞片的生长机模型

鳞片的生长是向线生长,这种向线性生长有别于根系的向地性或向水性。根系的向地性或向水性一般是指根系生长过程中向面或向点的生长趋势,而鳞片的向线生长是鳞片在轮生过程中都向中心茎秆或生长锥慢慢偏转的生长趋势,从而扩充了植物向性的概念范围,即向点、向面、向线生长。

鳞片生长机理的描述如图 2 所示,从生长点生长的初始轴向角为 β ,初始径向角为 α ,每生长一小段,生长向量就向着 y 轴偏转一个角度 θ_0 ,在整个生长过程中,偏转的角度总和小于等于 180° ,从图 2 中点 P_1 偏转 θ_0 角生长到点 P_2 时,对应的生长向量为 P_{12} ,且定义其对应的单位向量为 u ,然后又在 P_2 点偏转 θ_0 角度开始下一段的生长,生长到点 P_3 时,对应的生长向量为 P_{23} ,它的单位向量定义为 u' 。因此,向量 u 与向量 u' 之间的偏转变换关系可根据图 2 中的几何关系求解得到

$$u = Mu' \quad (1)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 + \cot\beta\sin\theta_0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_0 + \cot\beta\sin\theta_0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta_0 - \tan\beta\sin\theta_0 \end{bmatrix}$$

式中 M ——偏转变换矩阵

鳞片向中心茎秆或者生长锥偏转就能形成图 3 所示的生长趋势曲线 $l(t)$,且 $l(t)$ 是关于轴向生长速度 v 、时间 t 和偏转角 θ_0 的生长曲线,其中 t 的时间步长为 d 。在图 2 中作线段 P_1P_2 的垂直平分线,在该线上取一点 Q ,使得 $\angle P_1QP_2$ 的值为 θ_0 ,可得到

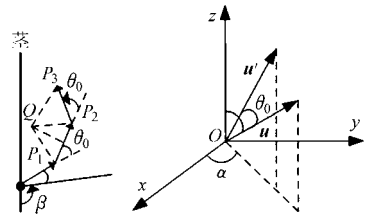


图 2 鳞片的生长模型示意图

Fig. 2 Sketch of scale's growth model

$\triangle P_1QP_2$ 和 $\triangle P_2QP_3$ 全等,从而可知 P_1, P_2, P_3 共圆。因此,以 Q 为极点, QP_1 为极轴来建立极坐标,则 $l(t)$ 用极坐标表示的极坐标方程为

$$\rho(\theta) = \frac{vd}{2\sin\frac{\theta_0}{2}} \quad (0 < \theta < \theta_0 t) \quad (2)$$

把 $l(t)$ 曲线作为鳞片轮廓控制的虚拟中心轴线,以该轴线为中心来绘制两相交的内外半椭圆,实现鳞片的横切面月牙形,其中内外半椭圆的长半轴 a 相等,短半轴 b_1, b_2 不相等,如图 3a 所示。当生长到 $l(t)$ 上的 P_1, P_2, P_3 点时,对应的 a, b_1, b_2 的长度如图 3b 所示,点 $P_1 (P_2 \text{ 或 } P_3)$ 上的 a, b_1, b_2 值就是鳞片此点径向生长所需的参数。

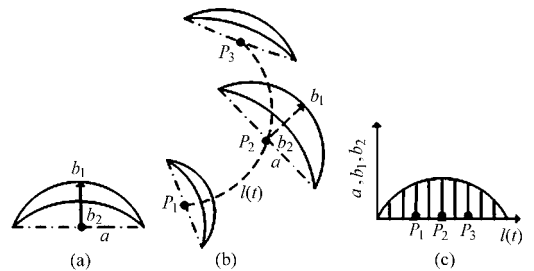


图 3 鳞片的轮廓示意图

Fig. 3 Sketch of scale's profile

鳞片轮廓控制曲线的获得,是先根据鳞片的轮廓定量取得若干点,再根据这些点用牛顿插值方法获得鳞片内外面轮廓的控制曲线,实验中定量取得这些插值点的方法如图 4 所示。它是长半轴 a 上取得对应插值点的方法。

采用数码相机获取鳞片图像,拍摄时,对鳞片与参照物(硬币)的位置进行特定的设置,将硬币置于左方,鳞片垂直放置在硬币的右方、不能偏斜,以便于后期确定参照物的大小和鳞片轮廓的图像分析,如图 4a 所示。

采用 Photoshop (PS) 对图像进行处理,除去图片的背景,便于图像分析时外围不产生噪声点,并在 PS 上对轮廓进行基本的选取,在闭合的轮廓内填充同一色,如图 4b 左边的硬币所示,从而使闭合的轮廓内没有色差。

对鳞片图像的分析是在 Matlab 上完成的。先读入图 4b 的图像后,把图像转换成灰度图,设定

鳞片图像阈值,对图像进行阈值分割,得到如图4c所示结果;图像阈值分割后,只有轮廓线上点的相邻像素点才会不同,因此,采用简单的八邻域轮廓跟踪算法提取其连续的轮廓线。如图4d所示,左半部提取的是参照物硬币的轮廓,右半部就是鳞片的轮廓。

确定鳞片表面轮廓对应插值点时,在参照物硬币轮廓中,计算其水平方向的最大、最小值,两者差值即为硬币直径,根据硬币实际直径(21 mm),可求得图像中像素长度与实际长度的比值。在鳞片轮廓中,查取其垂直方向的最大值对应的点和水平方向最大值与最小值连线中值对应的点,建立以此两点连接的直线为 x 轴的坐标,以最大值点为原点指向中值点的方向为 x 轴的正方向。进而对鳞片轮廓点进行相应的平移、旋转,然后取鳞片轮廓的右半部上的10个点为鳞片插值点,再利用像素长度与实际长度的比值,计算这些插值点的实际坐标值,并把其值放入模拟程序里面获得 a 的控制曲线,其插值点选得的效果如图4e所示。同理,可由鳞片纵切面的图片处理得到 b_1 、 b_2 上的插值点。

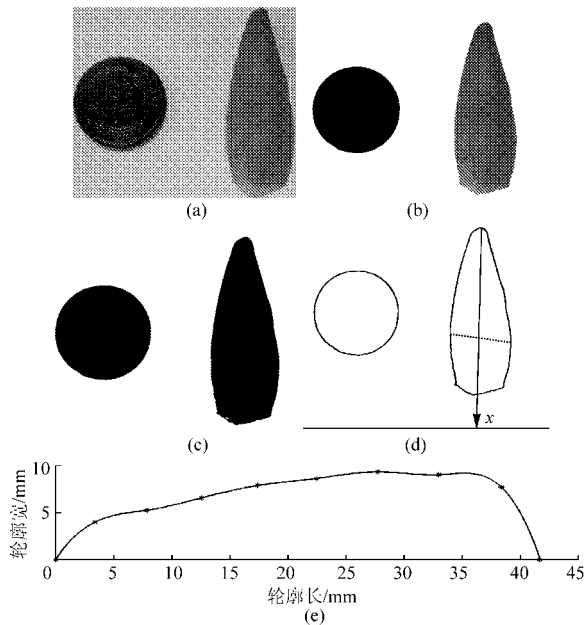


图4 取插值点的方法示意图

Fig.4 Method sketch of obtaining interpolation points

1.2 鳞片的可视化模型

鳞片截面的月牙形由两长半轴相等、短半轴不等的椭圆相交取半而成,因此单个鳞片可以看成由若干个生长轴线串联在一起的双半椭圆台的集

其中
$$R(\mathbf{u}, \gamma) = \begin{bmatrix} u_x^2(1 - \cos\gamma) + \cos\gamma & u_x u_y(1 - \cos\gamma) + u_z \sin\gamma & u_x u_z(1 - \cos\gamma) + u_y \sin\gamma \\ u_x u_y(1 - \cos\gamma) + u_z \sin\gamma & u_y^2(1 - \cos\gamma) + \cos\gamma & u_y u_z(1 - \cos\gamma) + u_x \sin\gamma \\ u_x u_z(1 - \cos\gamma) + u_y \sin\gamma & u_y u_z(1 - \cos\gamma) + u_x \sin\gamma & u_z^2(1 - \cos\gamma) + \cos\gamma \end{bmatrix}$$

合,即通过双半椭圆台叠加而成,所以鳞片可视化的关键就是双半椭圆台的可视化,其中两个长半轴相等,短半轴不等的椭圆相交,再取其中一半的椭圆台的可视化是通过四边形图元绘图来实现的,如图5a所示。在可视化实现过程中,两个双半椭圆台叠加,叠加的底面可视化不予考虑,只考虑双半椭圆台内外表面的可视化,内外表面的可视化就需要逐个取得半椭圆台上下表面内外半椭圆上点的坐标,然后依次逐点对内外表面进行绘制。

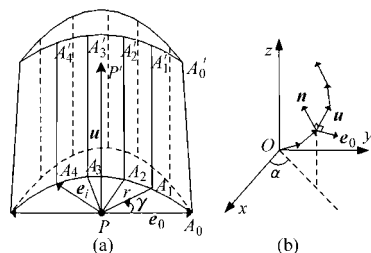


图5 鳞片的可视化示意图

Fig.5 Sketch of scale's visualization

在绘制过程中,为了保证画椭圆台表面时,内外表面画的都是椭圆长半轴的另一侧,即实现整个内表面或者外表面都向外凸出,所以必须选一特定的初始向量,即从 P 点指向 A_0 点的向量 P_0 ,其单位向量定义为 e_0 ,然后根据长半轴 a 的长度来确定起始点 A_0 ,再按逆时针方向依次旋转 π/n 的 γ 角,逐个取到半椭圆上的 N 点,这里 N 点对应的椭圆半径为 r ,对应的向量为 P_i ,其单位向量为 e_i 。其中向量 P_0 对应的单位向量 e_0 的选取如图5b所示,且必须满足如下3个条件:

- (1) 要与生长向量 u 垂直。
- (2) 向量 e_0 须与坐标平面 xOy 平行,如果不平行就要以向量 u 为轴旋转到与坐标平面 xOy 平行。
- (3) 向量 e_0 与向量 u 的差积所得的向量 n 在 z 轴上的分量 n_z 须大于0,如果不大于0,就取 e_0 的反向量。

这样取得的 e_0 向量确定的 A_0 点可以保证鳞片绘制过程中内外表面都向外凸出,从而两凸出表面围合就实现鳞片的凸体形状。

向量 e_0 取得后,该向量再以生长向量 u 为轴,按逆时针方向依次旋转 γ 角后,可分别得到 e_i ,而向量 e_i 与向量 e_{i-1} 的计算关系表达式可由向量旋转变换算法^[14]得到

$$e_i = R(\mathbf{u}, \gamma) e_{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中 $R(u, \gamma)$ ——向量旋转变换矩阵

根据式(3)的向量旋转变换算法取得半椭圆上 n 个点对应的单位向量 e_i 后, 这 n 个点的三维坐标计算式为

$$\begin{cases} A_i = P + P_i \\ P_i = e_i r \\ r = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2(i\gamma) + b^2 \cos^2(i\gamma)}} \end{cases} \quad i \in (0, 1, \dots, n) \quad (4)$$

式中 A_i —— O 点指向 A_i 点的向量

P —— O 点指向 P 点的向量

P_i —— P 点指向 A_i 点的向量

按照上述原理, 结合式(3)、(4)依次计算出点 A_0, A_1, A_2, A_3 等的坐标和 A'_0, A'_1, A'_2, A'_3 等的坐标后, 然后按 $A_0, A'_0, A'_1, A_1, A_2, A'_2$ 的顺序来绘制四边形图元, 实现半椭圆球台内表面的绘制; 同理, 可取得外表上对应点的坐标, 用四边形图元来绘制半椭圆台的向外凸出的外表面, 两个向外凸出的内表面和外表面围合就形成凸体鳞片。

在鳞片的可视化模拟实现过程中, 分为两类来进行, 一类是画鳞片的尖端段, 一类是画鳞片的其余半椭圆台段, 其片尖端视为椭圆锥, 而椭圆锥又可视作上底面聚合为一点的椭圆台。因此, 其双半椭圆台的可视化算法流程如图6所示, 其中根据初始向量 e_0 来确定 A_0 点, 这一步很关键。

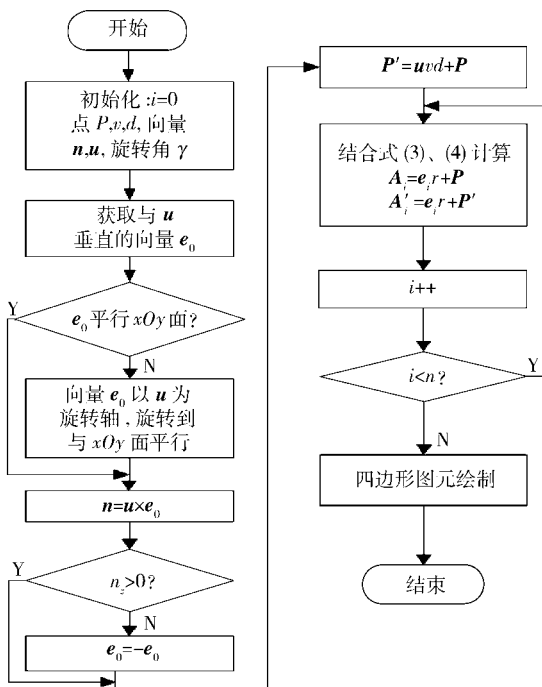


图6 鳞片可视化的算法流程图

Fig. 6 Flow chart of scale's visualization algorithm

2 系统实现与模拟结果

2.1 系统实现

模拟系统是在 Windows XP 操作系统上, 利用 Visual C++ 6.0 编程软件和 Open GL 图形库, 基于 MFC 框架来实现的。鳞茎的生长与绘制是一轮一轮来实现的, 每一轮生长的鳞片数在维管极数内是随机的, 一般是 1~15 片不等, 且内层鳞片的年龄小, 外层鳞片年龄大。为了实现内嫩外老这一过程, 可使刚长出的鳞片生长一段时间后整体向外偏转, 即可实现鳞片的周径增大。在该系统实现过程中, 每一轮生长的鳞片初始轴向角都为 β , 生长的时间是 t , 初始径向角是 α , 每长一轮 α 就逆时针偏转一个很小的角度 η , 使得每轮鳞片之间错开生长, 每轮生长起点由时间来控制, 当达到生长的时间点后, 鳞片开始绘制第 1 轮, 第 1 轮边生长, 鳞片整体边向外慢慢偏转一个小角度 φ , 直到生长时间结束才停止偏转; 达到第 2 轮开始生长的起始时间点时, 按第 1 轮生长规律绘制第 2 轮, 然后再按上述规律绘制第 3 轮, 依此类推, 形成了鳞茎, 从而实现鳞茎的周径随着生长时间的变长而变大。整个鳞茎实现过程的算法流程图如图 7 所示。

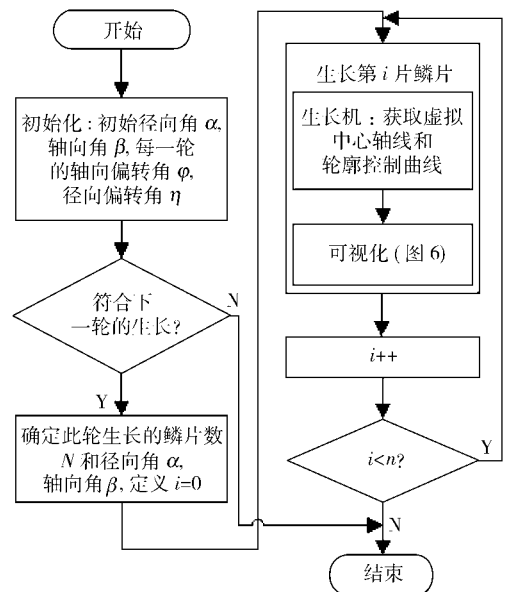


图7 系统实现的算法流程图

Fig. 7 Flow chart of system implementation algorithm

2.2 仿真结果与模拟数据

根据上述生长机与可视化的建模方法, 在计算机上进行可视化模拟的结果如图 8~10 所示。

图 8 是单个鳞片开始生长后 30 d、50 d、70 d 的可视化结果, 鳞片的舟形外表随着生长时间的变长而逐渐长大。

图 9 是鳞茎开始生长后 30 d、50 d、70 d 后的模

拟结果,随着鳞茎的生长时间增加,鳞茎的周径变大,且从正面看到的鳞片数量也增加,依次是3片、

4片、5片。

图10是百合整体地下组织下盘须根、鳞茎、上盘茎出根一起生长90 d、110 d、130 d的模拟结果,在这一生长阶段,下盘根的生长变化比较小,上盘根的生长变化比较大,鳞茎生长的变化情况与图9对应。

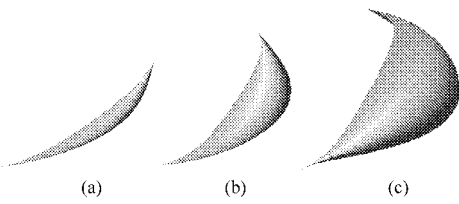


图8 鳞片生长的模拟结果

Fig. 8 Simulation result of scale's growth

(a) 生长30 d (b) 生长50 d (c) 生长70 d

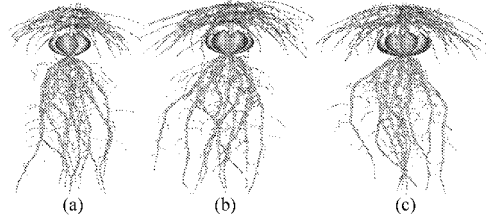


图10 百合地下组织生长的模拟结果

Fig. 10 Simulation result of lily's underground organ growth

(a) 生长90 d (b) 生长110 d (c) 生长130 d

根据上述模型不同时期百合地下组织的模拟输出数据如表1所示,从表中可看出,在90 d到130 d的生长期内鳞片的数量是增加的,在这3个时间点鳞片数量依次是24、32、40片,整个鳞茎的体积增加,表面积也增加,且跟实际采样观测到鳞片的体积和数量等估计值很接近。

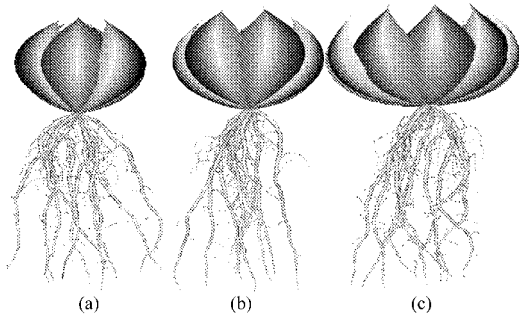


图9 鳞茎生长的模拟结果

Fig. 9 Simulation result of bulblet's growth

(a) 生长30 d (b) 生长50 d (c) 生长70 d

表1 不同时期百合地下组织的模拟输出值

Tab. 1 Simulation value of lily's underground organ in different periods

根类	第90天				第110天				第130天			
	根数	根长/cm	体积/cm ³	表面积/cm ²	根数	根长/cm	体积/cm ³	表面积/cm ²	根数	根长/cm	体积/cm ³	表面积/cm ²
鳞片	24	42.24	3.41	45.21	32	72.96	12.05	114.70	40	107.5	30.67	223.13
下盘根	10	135.0	1.65	49.86	10	162.0	2.37	65.54	10	192.0	3.32	84.57
茎出根	45	165.6	0.38	36.65	45	230.4	0.74	43.70	45	302.4	1.28	65.70

3 结束语

通过构建百合鳞茎单个凹体鳞片的生长机与可视化模型,根据鳞片层层错叠,紧密抱合成鳞茎的生长过程,建立鳞茎的可视化模拟系统,模拟结果表明该模型能形象地模拟百合鳞茎的生长与抱合过程。在模型中,将百合鳞片的生长当作一种特殊的类根来处理,扩展了根的概念范围;根据鳞片是向中心线偏转的向线生长机理,扩充了植物向性生长的概念范围。

建立的模型可以应用于实体的动态生长建模;

鳞片整体往外偏转的实现算法可以用来模拟植物器官受外界干扰,如风吹、压力影响的状态,也可以用来模拟花朵的生长与开放的动态过程;鳞茎受外界环境因素影响的状况模拟,需要对其生长机模型进行改造与完善,使其能够与外界环境参数进行交互。

该生长机模型还不是很严密,鳞片生长机中的所有偏转角都取的是固定值,没有考虑随机性;生长轮之间抱合紧贴的程度还不是很好,也就是片与片之间的约束生长机制还有待进一步解决;实际鳞片的切面不都是月牙形,本文中当作月牙形处理。这些都有待进一步完善。

参 考 文 献

- Fourcaud T, Zhang Xiaopeng, Stokes A, et al. Plant growth modelling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models [J]. *Annals of Botany*, 2008, 101(8):1 053 ~ 1 063.
- Prusinkiewicz P. Modeling plant and development [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7(1):79 ~ 83.
- 曹宏鑫,石春林,金之庆. 植物形态结构模拟与可视化研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3):669 ~ 677. Cao Hongxin, Shi Chunlin, Jin Zhiqing. Advances in researches on plant morphological structure simulation and visualization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3):669 ~ 677. (in Chinese)

- 4 Ijiri T, Owada S, Okabe M, et al. Floral diagrams and inflorescences; interactive flower modeling using botanical structural constraints [C] // Proceedings of SIGGRAPH 2005, 2005:720 ~ 726.
- 5 Ijiri T, Mihoshi Yoko, Saneyuki Kawabatal, et al. Surface-based growth simulation for opening flowers [C] // Proceedings of the Graphic Interface 2008, 2008:227 ~ 234.
- 6 廖桂平,李锦卫,欧中斌,等. 基于参数 L-系统的油菜花朵与花序生长可视化研究[J]. 农业工程学报,2009,25(4):150 ~ 156.
Liao Guiping, Li Jinwei, Ou Zhongbin, et al. Visual growth of flower and inflorescence of rapeseed (*Brassica napus* L.) based on parametric L-system [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4):150 ~ 156. (in Chinese)
- 7 陆玲,王蕾,杨勇,等. 基于平面变形的植物花瓣可视化造型[J]. 农业机械学报,2008,39(9):87 ~ 91.
Lu Ling, Wang Lei, Yang Yong, et al. Visualization modeling on plant petal based on plane deformation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):87 ~ 91. (in Chinese)
- 8 Kafashan J, Tijksens B, Moshou D. Image processing to create a realistic 3D model of apple based on its slices [C] // 2006 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper: 066003, 2006.
- 9 陆玲,王蕾. 基于椭球变形的植物果实造型[J]. 农业机械学报,2007,38(4):114 ~ 117.
Lu Ling, Wang Lei. Plant fruit modeling based on the distortion to ellipsoid [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):114 ~ 117. (in Chinese)
- 10 陆玲,周书民. 植物果实的几何造型及可视化研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(8):1739 ~ 1741.
Lu Ling, Zhou Shumin. Study on geometry model and visualization of plant fruit [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8):1739 ~ 1741. (in Chinese)
- 11 刘晓东,姚兰,赵飞蓉,等. 基于 Loop 细分格式的虚拟作物果实建模[J]. 中国农业大学学报,2007,12(2):72 ~ 75.
Liu Xiaodong, Yao Lan, Zhao Feirong, et al. Modeling of virtual crop fruit based on loop subdivision scheme [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(2):72 ~ 75. (in Chinese)
- 12 赵春江,陆声链,郭新宇,等. 西瓜三维形态几何建模和真实感绘制技术研究[J]. 中国农业科学,2008,41(12):4155 ~ 4163.
Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu, et al. Techniques for modeling 3-D shape and realistic rendering of watermelon [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12):4155 ~ 4163. (in Chinese)
- 13 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 the underground modified root of crops based on point clouds [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6):214 ~ 218. (in Chinese)
- 14 Lynch J P, Nielsen K L, Davis R D S, et al. SimRoot: modeling and visualization of botanical root systems [J]. Plant and Soil, 1997, 188:139 ~ 151.
- 15 戈振扬,严小龙,罗锡文. 根构型模拟模型及其应用[J]. 农业工程学报,2002,18(3):154 ~ 160.
Ge Zhenyang, Yan Xiaolong, Luo Xiwen. Simulation models of plant root system architecture and application: a review [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3):154 ~ 160. (in Chinese)
- 16 陆玲,王蕾. 植物叶脉可视化造型研究[J]. 农业机械学报,2011,42(6):179 ~ 183.
Lu Ling, Wang Lei. Visualization model of plant leaf vein [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):179 ~ 183. (in Chinese)
- 17 朱庆生,黄伟,屈洪春,等. 植物茎生长过程细粒度仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(3):192 ~ 196.
Zhu Qingsheng, Huang Wei, Qu Hongchun, et al. Fine-grained simulation of the plant stem growth process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):192 ~ 196. (in Chinese)