

基于图像处理的小麦叶片形态的三维重建

胡少军, 何东健*, 耿楠, 郭亚红

(西北农林科技大学信息工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 小麦叶片形态的复杂性使其很难在虚拟场景中真实表现, 主要考虑叶片边缘、生长曲线和叶片空间扭曲及卷曲现象, 提出一种基于图像的小麦叶片重建方法: 采用边缘检测法提取小麦叶片边缘数据, 根据小麦叶片生长曲线将边缘数据映射到三维空间, 并在此基础上给出了不带约束的叶片模型和带约束的叶片扭曲及卷曲模型。结果表明, 该方法采样精度高, 便于保持叶片真实形状和实现多细节层次模型(LOD)技术, 能较好模拟小麦叶片在空间的扭曲和卷曲现象。

关键词: 虚拟小麦; 边缘检测; 多细节层次模型; 叶片扭曲; 叶片卷曲

中图分类号: TP391.9; TP274.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)1-0150-05

胡少军, 何东健, 耿楠, 等. 基于图像处理的小麦叶片形态的三维重建[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 150-154.

Hu Shaojun, He Dongjian, Geng Nan, et al. 3D reconstruction of wheat lamina shape based on image processing[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 150-154. (in Chinese with English abstract)

0 引言

虚拟植物生长的计算机建模与可视化仿真研究在农林业、景观设计或园林设计、虚拟实现、计算机动画、计算机教学等领域都有着广泛的应用前景^[1,2]。虚拟小麦是虚拟植物的一个研究方向, 虚拟小麦主要研究建立能体现其内在生理特征的生理生态模型和外在表现的可视化模型, 目前国内外研究小麦生理生态模型较多, 而且已经建立了较成熟的小麦生理生态模型^[3], 但是从计算机图形学角度出发对虚拟小麦的可视化模型研究较少。而虚拟小麦可视化研究的难点之一在于如何真实表现小麦形态的不规则性。小麦叶片形态模拟是进行小麦植株整体可视化模拟的基础, 为模拟小麦叶片在三维空间的生长情况, 目前采用的叶片形态模拟方法有数值拟合法^[4,5]、透明背景贴图法^[6]和数学描述法^[7], 数值拟合法需要使用精密仪器采集植物空间数据, 然后用样条插值法拟合叶片形态建立叶片静态模型; 透明背景贴图法用含 α 通道的小麦叶片纹理贴图叶片空间模型完成模拟, 采用的叶片空间模型虽然可以控制叶片变形, 但未给出叶片空间的数学模型; 数学描述法是用经验公式近似描述叶形和叶缘波动现象。本文选取三种小麦叶片作为研究对象, 提出一种基于图像的小麦叶片重建方

法, 并结合数学描述法给出了叶片形态数据的提取重建方法和叶片变形的数学模型, 能够在保持叶片形态的情况下实时控制叶片的变形, 取得了较好的效果。

1 小麦叶片形态数据提取

本文叶片形态数据是指叶片轮廓和叶脉(叶片主脉)的位置信息。通常采用直接测量的方法获取小麦叶片形态数据, 相对于目前研究热点玉米叶片轮廓而言, 小麦叶片轮廓较小, 在叶片轮廓变化最快的叶尖部分很难精确测量, 即使获得了叶片的形态数据, 对于有限的叶片轮廓数据, 在重建小麦叶片形态时还需借助样条插值的方法保持轮廓边缘的光滑。数字图像处理技术有精度高、再现性好的特点^[8], 本文利用图像处理中的边缘检测技术提取出小麦叶片形态数据, 经过标定和规格化数据处理后存入数据库, 准备后期叶片的三维重建。

1.1 数据准备

不同品种小麦叶片形态存在差异, 但大致可以分为三类^[9]: 叶尖为钝形、叶尖为锥形、老化叶片中部收缩形。以三类型叶片为研究对象, 将叶片标本用双面胶贴在画有标定圆($\varnothing 10\text{ mm}$)白纸板(选用白纸板便于背景分割)上, 扫描后分割标定圆和叶片, 旋转分割后的叶片, 使叶脉底端切线垂直于叶片长轴, 便于三维重建后的小麦叶片形态的恢复。再将彩色图像转化为 256 色灰度图后用中值滤波去噪, 准备边缘检测。

1.2 边缘检测

数字图像函数 $f(i, j)$ 梯度的近似公式为^[8]:

$$G[f(i, j)] = \{[(f(i, j) - f(i + 1, j))]^2 + [(f(i, j) - f(i, j + 1))]^2\}^{1/2}$$

式中 (i, j) ——图像像素位置。用上式计算梯度后,

收稿日期: 2006-01-16 修订日期: 2006-07-30

作者简介: 胡少军(1980-), 男, 湖北松滋人, 主要研究领域: 图形图像处理与虚拟现实。杨凌 西北农林科技大学信息工程学院 50#, 712100

*通讯作者: 何东健(1957-), 男, 陕西西乡人, 教授, 博士生导师, 院长, 主要研究领域: 图像分析与识别, 智能化检测与控制, 多媒体技术网络应用。杨凌 西北农林科技大学信息工程学院 50#, 712100。Email: hdj168@163.com

采用下式生成梯度增强图像:

$$G[f(i,j)] = \begin{cases} Lg & G[f(i,j)] \geq T \\ f(i,j) & G[f(i,j)] < T \end{cases}$$

式中 T —— 阈值; Lg —— 边缘的灰度。

假设叶片左边缘位置为 (LX_i, LY_i) , 右边缘位置为 (RX_i, RY_i) 、叶脉位置为 (MX_i, MY_i) , 则叶脉位置可近似记为:

$$\begin{cases} MX_i = (LX_i + RX_i)/2 \\ MY_i = (LY_i + RY_i)/2 \end{cases}$$

$HWid_i = (RX_i - LX_i)/2$, 其中 $0 \leq i \leq MaxNum$ 。

1.3 标定及规格化处理

对标定圆从上向下、从左到右逐行搜索, 搜索到的第一个灰度值变化最大的点为切点。记上下切点 Y 坐标为 (y_1, y_2) , 左右切点 X 坐标为 (x_1, x_2) , 则从像素到毫米转换的比例因子 $FsCALE = [D/(x_2 - x_1) + D/(y_2 - y_1)]/2$ (mm/pixel), 其中 D 为圆的直径。规格化处理是将绝对坐标转化为相对坐标的过程, 规定相对坐标原点为叶脉最底端位置坐标 (MX_0, MY_0) 。则经过标定和规格化处理后的叶脉位置和叶宽信息可表示为:

$$\begin{cases} MX_i = fScale \times (MX_i - MX_0) \\ MY_i = fScale \times (MY_i - MY_0) \\ HWid_i = fScale \times HWid_i \end{cases}$$

息存入数据库, 数据表中的字段信息包括上述叶脉位置和叶宽信息。

2 基于小麦形态数据的三维重建

基于数据库中小麦形态数据和合理的假设条件, 本文实现了小麦叶片的三维重建, 并完成了扭曲、卷曲效果的数学模型。

2.1 条件与假设

假设 1: 小麦叶片厚度忽略不计。相对叶片的长度和宽度, 其厚度很小, 故不计叶片厚度;

假设 2: 同一叶片从生长直到死亡, 会发生宽度的缩放, 但叶片形状不变^[10, 11];

假设 3: 叶片的扭曲表现为叶片元绕叶脉旋转产生的变形;

假设 4: 叶片从萌芽到完全展开的卷曲表现为叶宽约束的圆半径的缩放过程。

2.2 无约束的小麦叶片模型与 LOD 实现

数据库中小麦叶片形态数据是二维数据, 为在三维空间中绘制小麦, 假定叶片深度位置为常数 d , 对应叶片左边缘、叶脉和右边缘位置信息可表为

$$\begin{cases} (Lx_i, Ly_i, Lz_i) = (MX_i - HWid_i, MY_i, d) \\ (Mx_i, My_i, Mz_i) = (MX_i, MY_i, d) \\ (Rx_i, Ry_i, Rz_i) = (MX_i + HWid_i, MY_i, d) \end{cases}$$

小麦叶片形态数据库中的数据以像素为单位, 采样密度大, 因此不必渲染每一组采样点。为提高渲染效率, 采用了多细节层次模型(LOD)技术, 实现的方法是: 设步长为 $step$, 当前渲染采样点索引 i 的下一组采样点索引为 $i + step$, 根据叶片离观察点位置的远近动态调节 $step$, 从而实现小麦叶片不同细节层次的渲染。图 1 是在不同步长情况下绘制的叶片线框图。

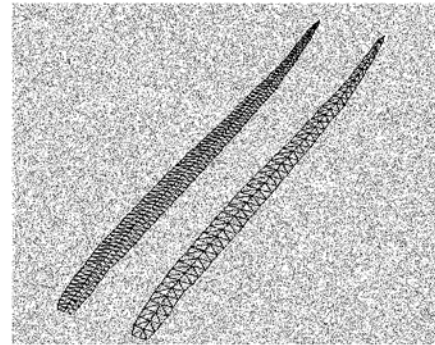


图 1 不同步长情况下绘制的叶片线框图
Fig. 1 Rendering the wheat lamina wire frame with different steps

2.3 生长曲线约束的小麦叶片模型

无约束的小麦叶片模型只能还原小麦的二维形状, 但自然情况下生长的小麦叶片往往不在一个平面上, 而是按照某一生长曲线^[12-14]生长的, 需要考虑约束的影响, 如图 2 所示。一般情况下, 小麦叶曲线的叶脉呈一条光滑的二维曲线, 常用一般二次方程表征^[7], 本文采用将生长曲线数据离散化后映射到小麦形态数据库中实现了小麦叶片的弯曲。

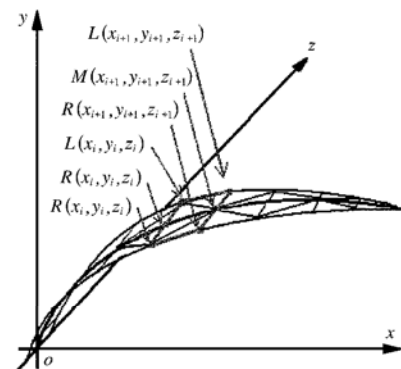


图 2 生长曲线约束的小麦叶片及叶片元定义
Fig. 2 Growth curve restricted laminae and its element

假设生长曲线方程满足 $y = f(x), z = 0$ (其中 $x_0 \leq x \leq x_1$)。基于假设 2, 小麦叶片长度 MY_{maxNum} 和生长曲线长度 $CurveLen$ 成正比, 当 $CurveLen$ 大于 MY_{maxNum} 时表明数据库中的小麦形态数据需要放大 K 倍, 反之缩小 K 倍, 式中: $K = CurveLen/MY_{maxNum}$; $CurveLen =$

$(x_1 - x_0)/dx$
 $\sum_{j=0}^{i-1} \{ [f(x_{j+1}) - f(x_j)]^2 + dx^2 \}^{1/2}$; dx 为步长。令生长曲线上某一离散点坐标为 $(x_i, y_i, 0)$, 则对应叶片形态数据表的索引值为

$$Index_i = MaxNum \times \sum_{j=0}^i \{ [f(x_{j+1}) - f(x_j)]^2 + dx^2 \}^{1/2} / CurveLen$$

在叶片形态数据库中查找索引为 $Index_i$ 的记录, 该记录对应的叶片形态数据即为当前生长曲线离散点对应数据, 因此曲线 $(x_i, y_i, 0)$ 对应的小麦叶片左边缘、叶脉和右边缘的位置可表为

$$\begin{cases} (Lx_i, Ly_i, Lz_i) = (x_i, f(x_i), K \times (MX_{Index_i} - HWid_{Index_i})) \\ (Mx_i, My_i, Mz_i) = (x_i, f(x_i), K \times (MX_{Index_i})) \\ (Rx_i, Ry_i, Rz_i) = (x_i, f(x_i), K \times (MX_{Index_i} + HWid_{Index_i})) \end{cases}$$

同 2.2, 改变 dx 的大小也能很方便地实现 LOD, 在此基础上对生长曲线方程进行变换可实现叶片任意方向的弯曲。

2.4 带约束的小麦叶片扭曲模型

基于假设 3, 在 2.3 的基础上保持叶脉位置不变, 如图 2 所示, 定义叶片片元为 $((Lx_i, Ly_i, Lz_i), (Lx_{i+1}, Ly_{i+1}, Lz_{i+1}), (Mx_i, My_i, Mz_i), (Mx_{i+1}, My_{i+1}, Mz_{i+1}), (Rx_{i+1}, Ry_{i+1}, Rz_{i+1}), (Rx_i, Ry_i, Rz_i))$, 对应于图 3 中的多边形 $L1 - L2 - M2 - R2 - R1 - M1 - L1$, $M1L1$ 为 $1/2$ 叶宽向量, $M1M2$ 为叶脉向量, 平面 $L1 - R1 - Q$ 垂直于平面 $L1 - R1 - R2 - L2$, 则绕平面 $L1 - R1 - Q$ 法向量 $M1P$ 旋转 θ 弧度后的向量为 $M1L1'$, 这里需求出新的叶片左边缘 $L1'$ 的位置坐标 (Lx_i, Ly_i, Lz_i) 。显然

$$\begin{cases} M1M2 = (dx, f(x_{i+1}) - f(x_i), \\ \quad K \times (MX_{Index_{i+1}} - MX_{Index_i})) \\ M1L1 = (0, 0, -K \times HWid_{Index_i}) \end{cases}$$

由 $M1P = M1L1 \times M1Q$ 和 $M1Q = M1M2 \times M1L1$ 得:

$$M1P = (dx, f(x_{i+1}) - f(x_i), 0)$$

又

$M1P \perp M1L1'$, $M1L1' \cdot M1L1 = |M1L1'| \cdot |M1L1| \cdot \cos\theta$
 故有

$$\begin{cases} Lx_i = x_i - K \times HWid_{Index_i} \times \sin\theta \times (f(x_{i+1}) - f(x_i)) / \sqrt{dx^2 + (f(x_{i+1}) - f(x_i))^2} \\ Ly_i = f(x_i) + K \times HWid_{Index_i} \times \sin\theta \times dx / \sqrt{dx^2 + (f(x_{i+1}) - f(x_i))^2} \\ Lz_i = K \times MX_{Index_i} - HWid_{Index_i} \times (1 + \cos\theta) \end{cases}$$

同理可得右边缘 (Rx_i, Ry_i, Rz_i) 的表达式。

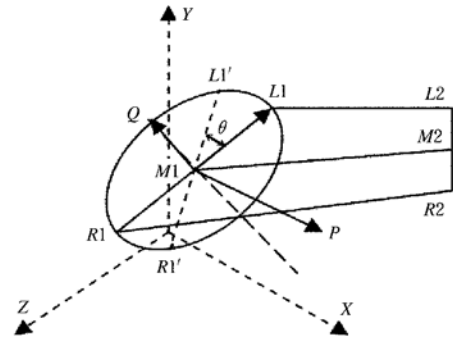


图 3 叶片片元扭曲后的空间位置

Fig. 3 Laminae element position after being twisted

2.5 带约束的小麦叶片卷曲模型

基于假设 2 和假设 4, 可以用伸缩和卷曲变换模拟小麦叶片从萌芽到完全展开的全过程。

2.5.1 小麦叶片卷曲半径模型

观察小麦叶片可以发现: 离叶片底端越近的地方, 叶片包裹得越紧, 这是由于叶片底端受到的叶鞘和茎部约束力较大。假设叶片底端是半径为 R_0 的弧形(或圆形), 令叶脉上的一点 P_i 处的叶片包裹半径为 R_i , 且 P_i 到叶片底端的距离为 L_i , 叶片全长为 L 。则 R_i 用线性模型表示为

$$R_i = (1 + \lambda \times L_i/L) \times R_0$$

式中 λ ——经验值, $L_i/L = \sum_{j=0}^i \{ [f(x_{j+1}) - f(x_j)]^2 + dx^2 \}^{1/2} / CurveLen$ 。根据半径 \times 弧度 = 弧长有:

$$\varphi = 2 \times HWid_{Index_i} / ((1 + \lambda \times L_i/L) \times R_0)$$

2.5.2 带约束的小麦叶片卷曲模型

如图 4, 设 OR 是收缩圆上的向量, 考虑到 $|OR| = R_i$, $OR \perp M1P$, 设 O 点坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 则圆弧上点的坐标 $R_{i\varphi}(x_{i\varphi}, y_{i\varphi}, z_{i\varphi})$ 满足方程:

$$\begin{cases} (x_{i\varphi} - x_0)^2 + (y_{i\varphi} - y_0)^2 + (z_{i\varphi} - z_0)^2 = R_i^2 \\ (x_{i\varphi} - x_0) \times dx + (y_{i\varphi} - y_0) \times (f(x_{i+1}) - f(x_i)) = 0 \end{cases}$$

结合 2.5.1 有:

$$\begin{cases} x_{i\varphi} = x_i - K \times (1 + \lambda \times L_i/L) \times R_0 \times (1 + \cos\varphi) \times (f(x_{i+1}) - f(x_i)) / \sqrt{dx^2 + (f(x_{i+1}) - f(x_i))^2} \\ y_{i\varphi} = f(x_i) + K \times (1 + \lambda \times L_i/L) \times R_0 \times (1 + \cos\varphi) \times dx / \sqrt{dx^2 + (f(x_{i+1}) - f(x_i))^2} \\ z_{i\varphi} = K \times (MX_{Index_i} - HWid_{Index_i}) + K \times (1 + \lambda \times L_i/L) \times R_0 \times \sin\varphi \end{cases}$$

式中 $\varphi \in (\pi - \varphi/2, \pi + \varphi/2)$ 。

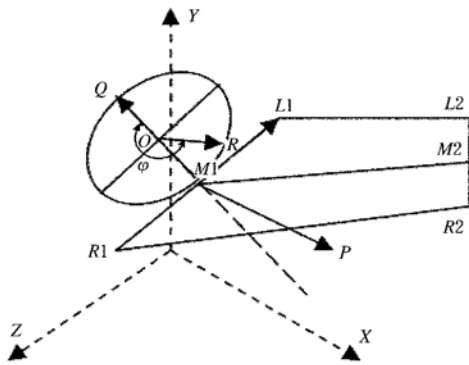


图 4 叶片片元卷曲后的空间位置

Fig. 4 Laminae element position after being wrapped

3 试验结果与分析

选择一锥形小麦叶片为试验对象, 图像处理可获取 920 组叶片形态数据。生长曲线采用变形悬挂线方程 $f(x) = -a \cosh((x + x_0)/a) + a \cosh(x_0/a)^{112}$ 绘制的弯曲叶片如图 5 所示。给定初始旋转位置 $(x_1 - x_0)/(8 \times dx) + \text{rand()} \% [(x_1 - x_0)/(4 \times dx)]$, θ 从 0 到 2π 之间变化, 将产生如图 6a 所示的叶片扭曲效果, 若 θ 在 0 到 4π 之间变化叶片将绕生长曲线旋转两周。等分圆弧 16 段, $\theta = \pi$, 模拟的叶片卷曲效果如图 6b 所示, 如果让 θ 从 2π 到 0 之间变化并实时改变生长曲线的长度, 可以动画显示叶片的伸展过程。

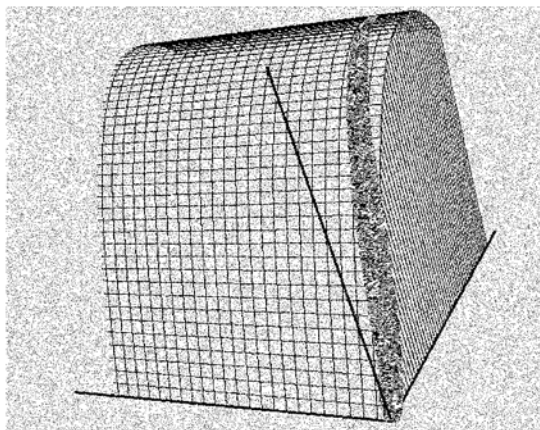
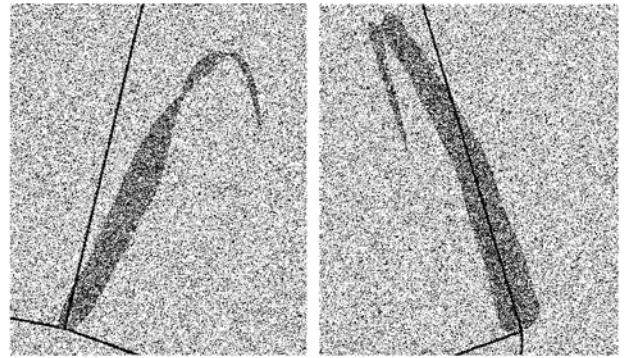


图 5 生长曲线约束的小麦叶片模拟

Fig. 5 Simulation of growth curve restricted laminae

试验结果表明: 1) 图像处理方法能检测小麦叶尖轮廓的细微变化, 与直接测量相比, 提取的小麦叶片轮廓信息精度高、密度大, 所以三维重建时完全可回避样条插值并能很好保持叶缘形状; 2) 传统方法没有考虑叶片在自然情况下的扭曲及卷曲变形现象, 而本文建立的生长曲线约束的小麦叶片模型能灵活控制叶片扭曲和卷曲效果, 真实表现自然情况下小麦叶片的生长情况。



a. 叶片扭曲

b. 叶片卷曲

图 6 叶片变形模拟效果

Fig. 6 Simulation of two types of distortion wheat laminae

4 结论

- 1) 采用图像处理的办法能检测到小麦叶尖轮廓的细微变化, 较好地保持了叶缘形状;
- 2) 提出了一种模拟小麦叶片扭曲和卷曲的数学模型, 新的叶片模拟方法便于实现层次细节技术;
- 3) 该模型不适合模拟表面不平整的叶片, 而且为了简化模型, 没有考虑叶片厚度, 因此不适合模拟需考虑厚度的叶片。结合小麦叶片随生长长度日变化模型、小麦分蘖模型等作物生长模型, 并从计算机图形学角度给出光照、阴影的计算方法将是下一步研究方向。

[参 考 文 献]

- [1] de Reffye Ph, Fourcaud T, Blaise F. A functional model of tree growth and tree architecture[J]. Silva Fennica, 1997, (31): 297- 311.
- [2] de Reffye Ph, Houllier F. Modeling plant growth and architecture: some recent advances and applications to agronomy and forestry[J]. Current Science, 1997, (73): 984- 992.
- [3] 严红平. 基于子结构和水力模型的虚拟植物建模与可视化研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2002.
- [4] 刘卫红, 张 正, 毕务良. 玉米叶片形态的数值模拟[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(6): 135- 141.
- [5] 郑文刚, 郭新宇, 赵春江, 等. 玉米叶片几何造型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 152- 154.
- [6] 熊海桥, 蒋立华, 李 磊, 等. 基于图像图形相结合的植物叶子动态生长显示[J]. 计算机工程与应用, 2003, (20): 207- 209.
- [7] 赵春江, 郑文刚, 郭新宇, 等. 玉米叶片三维形态的数学模拟研究[J]. 生物数学学报, 2004, (19): 493- 496.
- [8] 何东健, 耿 楠, 张义宽. 数字图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 75- 80.
- [9] 杜怡斌, 李丽云, 申瑞田, 等. 小麦个体发育[M]. 北京: 农业出版社, 1983: 39- 41.

- [10] Chiba N, Ohshida K, Muraoka K. A growth model having the abilities of growth-regulations for simulating visual nature of botanical trees[J]. *Computers & Graphics*, 1994, (18): 469- 479.
- [11] Chiba N, Ohshida K, Muraoka K, et al. Visual simulation of leaf arrangement and autumn colors [J]. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 1996, (7): 79- 93.
- [12] 赵 星,熊范纶,Philippe de Reffye. 一种新的植物枝条弯曲生成算法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2001, 31(6): 714- 720.
- [13] 宋有洪,郭 焱,李保国. 基于器官生物量构建植株形态的玉米虚拟模型[J]. *生态学报*, 2003, 23(12): 2579- 2586.
- [14] 李 磊,刘晓东,罗铁先,等. 基于控制点的玉米雄穗生长形态建模[J]. *计算机工程与应用*, 2004, (9): 203- 205.

3D reconstruction of wheat lamina shape based on image processing

Hu Shaojun, He Dongjian^{*}, Geng Nan, Guo Yahong

(College of Information Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: It is difficult to render the shape of natural wheat lamina in virtual scenes because of its complex and irregular structure. A new image-based 3D reconstruction method, which concentrates on lamina edges, growing curves and the phenomena of lamina twisting and wrapping effect, has been put forward. This method was implemented by employing the edge detection method to extract wheat lamina edge data and mapping the 2D edge data to 3D space according to a wheat curve function. Furthermore, an unrestricted lamina model and a restricted lamina twisting and wrapping model were constructed based on the method. The results show that the new method is convenient for keeping the natural shape of lamina and implementing the Level-of-Detail model, and works well on simulating twisting and wrapping effect of wheat lamina.

Key words: virtual wheat; edge detection; Level-of-Detail model; lamina twist; lamina wrap