

玉米叶片形态建模与网格简化算法研究

肖伯祥^{1,2}, 郭新宇¹, 王纪华¹, 郑文刚¹, 王丹虹²

(¹国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089; ²大连理工大学计算机技术研究所, 大连 116024)

摘要:【目的】协调禾本科作物形态模型的可视化效果和计算效率之间的关系。【方法】提出一种利用非均匀有理 B 样条 (NURBS) 插值结合使用多直线段分裂算法 (splitting) 来重建玉米叶片三维形态并实现曲面网格简化控制的方法。【结果】该方法利用三维数字化仪采集的数据点, 通过计算节点矢量、差值计算反求曲面控制点等步骤构造出玉米叶片曲面, 具有较强地真实感效果; 根据叶片形态特征, 采用多直线段分裂算法的逆运算来对叶片曲面网格数量进行简化, 在尽可能保持曲面特征的同时可显著降低网格数目。【结论】应用该方法进行玉米冠层可视化与光分布计算, 结果表明, 在不显著增大计算误差的前提下, 可以明显地提高计算效率。

关键词: 玉米叶片; NURBS; 形态建模; 网格简化; 光分布计算

Maize Leaf Morphological Modeling and Mesh Simplification of Surface

XIAO Bo-xiang^{1,2}, GUO Xin-yu¹, WANG Ji-hua¹, ZHENG Wen-gang¹, WANG Dan-hong²

(¹National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089; ²Institute of Computer Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: 【Objective】 The study was conducted to harmonize the relationship between visual effects and calculation efficiency of crop morphological models. 【Method】 This was done using morphological modeling of maize leaves based on Non-Uniform Rational B-Splines (Nurbs) interpolation combined with multi-line segment splitting algorithms. Controllable mesh simplification of triangular surface was introduced. 【Results】 Scientists used a group of three-dimensional data points from a scanning device. The crop leaf crooked surface with a 3D effect was constructed using a vector calculation. Crooked surface control points resulted by useing interpolation calculation, etc. According to leaf morphological characteristic, leaf surface mesh amount was simplified by inverse operations of multi-line segment splitting algorithm, and the mesh amount declined with available maintenance of surface characteristics. 【Conclusion】 This method was used to calculate visualization and light distribution and the results showed that calculation effects could be improved clearly when a calculation error was not increased remarkably. The method could reflect model details and provide the solution to harmonize the relationship between visual effects and calculation efficiency of crop morphological models.

Key words: Maize leaf; NURBS; Morphological modeling; Mesh simplification; Light distribution calculation

0 引言

【研究意义】 植被的形态结构研究一直是生物学、农学等领域研究的重要方面, 计算机技术的发展使得模拟植被三维形态结构成为可能^[1,2]。【前人研究进展】 对于大部分作物而言, 其地上部形态结构特征主要由呈垂直状态的茎秆以及与茎秆形成各种角度和

方向的叶片所决定, 因此作物叶片的形态建模一直是研究者关注的重点问题之一, 有关这方面的研究已经有了较多报道。Espana 等^[3]用一个近似于叶片的长方形二维参数平面来模拟玉米叶片; 邓旭阳等^[4]提出了基于 Cardinal 样条插值和三角面片的叶片静态建模方法; 刘晓东等^[5,6]利用 Bezier 曲线和 NURBS 曲面进行植物叶片形态模拟; 赵春江等^[7]提出了基于玉米叶片

收稿日期: 2005-02-26; 接受日期: 2006-07-03

基金项目: 国家“863”计划课题(2003AA209020)和北京市自然科学基金项目(4032011)

作者简介: 肖伯祥(1981-), 男, 河北沽源人, 博士研究生, 研究方向为作物数字化设计。通讯作者郭新宇(1973-), 男, 辽宁建平人, 副研究员, 研究方向为作物数字化设计。Tel: 010-51503422; E-mail: guoxy@nercita.org.cn

形态特征参数的建模方法。【本研究切入点】以往的研究大多仅从叶片几何造型的角度出发,很少考虑到可视化计算的需要。而在作物形态结构的分析中涉及大量网格计算问题,如对作物冠层光分布的计算^[8~11],使得计算速度成为实现模拟和可视化的瓶颈,因此在作物叶片几何建模中考虑网格简化问题是十分必要的。【拟解决的关键问题】作物的器官多为不规则的形状和表面,非均匀有理 B 样条(NURBS)方法是一种较为高效的描述作物器官几何构型的方法^[12],它同时具有有理样条和非均匀样条的性质,既能描述自由型曲线曲面又能精确表示二次曲线弧和二次曲面。本文以玉米叶片为例,基于三维数字化仪获取的数据点,提出了一种利用 NURBS 插值结合使用多直线段分裂算法(splitting)来重建作物叶片三维形态并实现曲面网格简化控制的方法,并应用于玉米冠层可视化及光分布计算。

1 玉米叶片形态建模方法

玉米叶片着生在茎秆上,叶姿挺拔,叶片中央纵贯一条细长而坚硬的叶脉,叶片边缘有波状的皱褶,形态特征十分明显。参照郑文刚等人方法^[13],利用三维数字化仪获取了玉米品种农大 108 穗位叶叶片表面上一组具有拓扑矩形结构的特征点(型值点) $Q_{i,j}$ ($i=0,1,\dots,m,j=0,0,\dots,n$),将叶脉曲线的方向(叶长方向)定为 u 向,垂直于叶脉曲线的方向(叶宽方向)定为 w 向,如图 1-a 所示。基于 NURBS 曲面插值法,通过这组型值点可计算出节点矢量,进一步求出 NURBS 基函数,并反求出 NURBS 曲面的控制顶点,如图 1-b 所示。按照公式(1)可逐点计算出 NURBS 曲面上任意参数 (u, w) ($u \in [0,1], w \in [0,1]$) 所对应的点:

$$P(u, w) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) \cdot B_{j,h}(w) \cdot W_{i,j} \cdot V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) \cdot B_{j,h}(w) \cdot W_{i,j}} \quad (1)$$

在公式(1)中, $V_{i,j}$ 为控制顶点, $W_{i,j}$ 为权因子, $B_{i,k}(u)$ 和 $B_{j,h}(w)$ 分别为沿 u 向的 k 次和沿 w 向的 h 次 B 样条基函数。

根据所求得的控制顶点和节点矢量即可构造出叶片曲面模型并生成 NURBS 曲面。图 1-c 为使用上述方法建立的玉米叶片曲面线框图,使用的插值步长等于节点区间长度的五分之一,即在相邻型值点之间插

入 4 个点,来构造叶片网格模型;图 1-d 为该网格模型实体形状,具有较强的真实感。

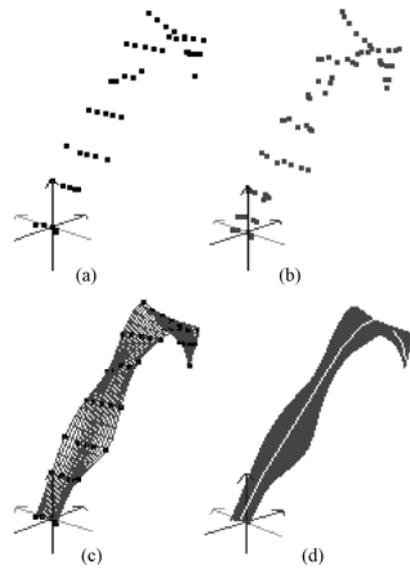


图 1 玉米叶形态的 NURBS 插值建模方法

Fig. 1 The modeling method of maize leaf using NURBS interpolation

2 叶片曲面网格的简化

曲面在计算机上显示时是由大量微小的网格组成。一般来说,网格划分的越细腻,曲面的可视化效果越好。然而,网格越小,构成曲面的网格数量越多,会显著降低计算效率。为了解决这一矛盾,本文提出了一种适合于作物叶片曲面简化的方法,研究者可根据不同研究的需要对曲面网格进行简化,从而提高计算效率,动态协调作物叶片形态的可视化效果和计算效率之间的关系。

基于上述的玉米叶片网格模型,定义叶片曲面上由相邻型值点构造出的网格为标准网格,插值生成的网格为参照网格(图 1-c)。当研究者要对参照网格进行简化时,首先通过增大插值步长的方式使插值点数量减少,直至插值点数为零,这时参考网格简化为标准网格。当需要对标准网格继续简化时,可采用多直线段分裂算法的逆运算来实现。多直线段分裂算法描述如下:对于一组点(如图 2 所示的 6 个点),(1)选取起始两个端点的连线作为初始线段,并在剩余点中选取一级特征点,即与此线段距离最大(d_{max})的点,如图 2-a 所示。(2)以该特征点到上一级特征点的连

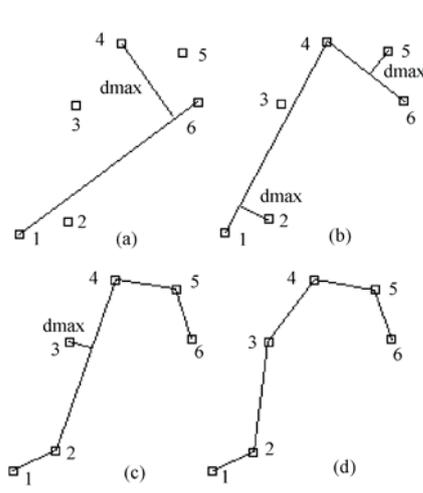
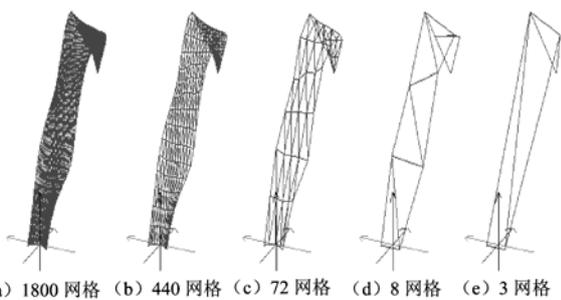


图 2 多直线段分裂算法提取特征点示意图

Fig. 2 Sketch using the multi-line segment splitting algorithms distill characteristic dot



(a) 为参照网格; (b) 为增大插值步长后生成的网格; (c) 为标准网格; (d) 为在 u 向经过两次细化后的网格; (e) 网格细化过程中一级特征点构成的网格
(a): Mesh with 1800 triangles (the reference mesh), (b): Mesh with 440 triangles, (c): Mesh with 72 triangles (the standard mesh), (d): Mesh with 8 triangles, (e): Mesh with 3 triangles

图 3 玉米叶片简化后的网格图形

Fig. 3 Simplified Mesh shape of maize leaf

线作为一级线段代替初始线段, 再在剩余点中选取与一级线段所在直线距离最大的点作为二级特征点, 如图 2-b 所示。(3) 以此类推, 直至所有点都作为特征点构成线段。对于本研究中获取的玉米叶片上的型值点, 采用多直线段分裂算法, 可先在一个方向上 (如 u 向) 进行线段细化, 然后再在另一方向 (w 向) 行线段细化, 直至细化网格等于标准网格。通过这种细化方法的逆运算, 可对标准网格进一步简化, 直至到用 3 个三角形网格来表示 (图 3)。

表 1 是利用简化后的玉米叶片几何模型计算出的

用来反映叶片空间形态的特征值^[13] (表 1)。从图 3 和表 1 可以看出, 本文提出的简化方法可以显著地减少构成叶片的网格数, 提高计算效率。当叶片网格数目从 1 800 下降到 8 时, 叶片的面积和投影面积的误差增加均不超过 5%, 当网格数目低于 8 时, 误差才显著增大。因此, 该方法适用于玉米叶片形态建模及可视化计算分析, 能动态地满足可视化效果和计算效率之间的不同需求。

表 1 不同网格规格计算出的玉米叶片面积和投影面积值
Table 1 Maize leaf area and projection area calculated by different mesh scales

网格数目 Mesh number	1800	440	72	8	3
面积(m ²) Leaf area	0.123	0.123	0.122	0.118	0.102
投影面积(m ²) Projected leaf area	0.808	0.807	0.801	0.785	0.689

3 玉米冠层可视化及光分布计算

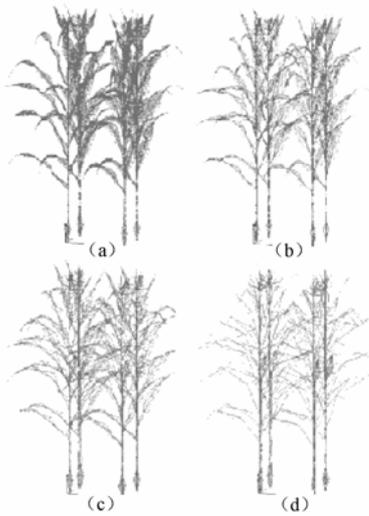
利用上述方法, 笔者重构了玉米冠层并比较分析了不同网格规格下冠层光分布的计算结果。

2005 年在北京市农林科学院院内农场用美国 Polhemus 公司的 3SpaceFastrak 三维数字化仪 (精度为 0.08 cm) 采集了玉米品种“农大 108”吐丝期的冠层三维结构数据。实测的冠层由在田间排列成 3 行 3 列的 9 株玉米组成, 行距为 60 cm, 株距为 30 cm, 株高为 245 cm。按王锡平等方法^[14], 对实测域进行复制, 拓展产生了虚拟冠层, 最终进行光分布计算的冠层由 81 个植株个体组成, 排列成 9 行 9 列。分别按 440、72、36 和 4 的叶片网格规格进行了玉米冠层的三维重构, 并计算了不同网格规格下冠层的形态特征参数 (表 2)。

表 2 不同网格规格冠层形态特征参数

Table 2 Maize canopy morphological character parameters calculated by different mesh scales

特征参数 Character parameter	网格数 Mesh number			
	440	72	36	4
叶面积(m ²) Leaf area	76.5	75.42	74.79	60.53
总投影叶面积(m ²) Total projected leaf area	31.6	30.9	31.76	24.32
垂直投影叶面积(m ²) Vertical projected leaf area	10.89	10.7	10.82	8.94



(a) 440 个网格；(b) 72 个网格；(c) 36 个网格；(d) 4 个网格
 (a) Mesh with 440 triangles; (b) Mesh with 72 triangles; (c) Mesh with 36 triangles (the standard mesh); (d) Mesh with 4 triangle

图 4 计算机重建的不同网格规格下的玉米冠层
 Fig. 4 The maize canopy realized on the compute by different mesh scales

由图 4 和表 2 可见，随着叶片曲面网格数目的增加，对冠层的描述越细腻，真实感效果越好，同时叶面积也呈增加趋势。

作物在自然界中接受辐射主要包括太阳直射光和天空散射光两大部分，本文引用了王锡平等人提出的玉米冠层光分布计算方法，进行基于网格的计算^[14]。直射光模拟算法如下：用沿一定角度的射线群模拟太阳光线，密度可根据光强的要求决定，对每一条射线（太阳光）进行判断，与那些网格（三角形）相交，然后再将所有与这条射线（太阳光）相交的网格进行深度排序，深度最小（即 z 坐标最大）的网格为直接受到阳光直射的网格，修改网格属性，次级深度最小（z 坐标仅次于深度最小网格）的网格受阳光的二级辐射，修改网格光照属性，认为其他网格不受阳光直射。散射光模拟算法为：以冠层内任意点为中心，建立上半球面模拟天空，将半球面划分成微小网格，用网格中心点到球心之间的连线模拟天空散射光线，当直线上存在网格时认为此光线被遮挡，累计被遮挡网格总数，计算天空透光率即可求得该点散射光强分布情况，循环遍历所有网格和射线。上述算法是基于有限元的计算，计算效果较逼近真实结果，但也存在计算量过大等弊端，计算时间直接受网格数量影响。本文提出的可控网格划分方法可以灵活地控制网格数

量，通过减少网格的数量来提高计算效率。

以计算吐丝期冠层上午 10 时的光强分布为例。表 3 显示了不同网格规格下冠层内部不同高度矩形区域的直射光透光率，所选区域为冠层模型内部（180 cm × 90 cm）的水平面内区域，角点坐标为（150 cm，75 cm）、（330 cm，165 cm）；表 4 显示了不同网格规格下冠层内部不同位置点的散射光天空可见率。从表 3 和表 4 可以看出，当网格数量从 440/叶下降到 36/叶时，计算误差变化幅度不是很大；而模拟计算量大大降低，计算时间缩减到 4%，这对于提高光分布模型的计算效率具有重要的现实意义。用户可在计算误差允许范围内，通过降低网格规格来提高计算效率。此外用户还可通过误差修正系数降低计算误差。

表 3 不同网格规格冠层内部不同高度矩形区域的直射光透光率

Table 3 Rate of transmitting direct light within rectangular area at different canopy heights calculated with different mesh scales

高度 (cm) Height	网格数 Mesh number			
	440	72	36	4
0	0.15	0.15	0.14	0.21
50	0.09	0.10	0.10	0.16
100	0.12	0.12	0.12	0.21
150	0.24	0.25	0.24	0.41
200	0.53	0.55	0.54	0.73
225	0.87	0.88	0.89	0.95

表 4 不同网格规格冠层内部不同位置点的散射光天空可见率

Table 4 Scattered light distribution in different canopy heights calculated with different mesh scales

空间点 (cm) Spot	网格数 Mesh number			
	440	72	36	4
(270 135 50)	0.35	0.35	0.35	0.44
(270 135 100)	0.22	0.24	0.24	0.36
(270 135 200)	0.29	0.30	0.30	0.45
(210 135 100)	0.22	0.23	0.24	0.37
(210 105 100)	0.25	0.27	0.28	0.33
(210 105 50)	0.30	0.32	0.32	0.45

4 讨论

在进行玉米冠层形态特征参数及光分布的计算时发现，当叶片网格数由 440 简化到 36 时，冠层的叶面积值、总投影面积值和垂直投影面积值均未显著改变，冠层内部不同高度矩形区域的直射光透光率和不同位

置点的散射光天空可见率的变化率均低于 8%，而计算时间降低到 4% 以下；当叶片网格数低于 36 时，冠层的叶面积值、总投影面积值和垂直投影面积值呈减小的趋势，且变化率逐渐增大。冠层内部不同高度矩形区域的直射光透光率和不同位置点的散射光天空可见率随着网格数减少呈增大趋势，且变化速率逐渐增大。由此说明，在叶片网格数目不低于 36 时，应用本方法可以在不显著增大计算误差的前提下，明显地提高计算效率，从而为协调禾本科作物形态模型的可视化效果和计算效率之间的关系提供了解决方案。综合考虑计算精度与计算速度两方面需求，本文认为比较好表达玉米形态的最少网格数在 8~36 之间。

5 结论

本文以玉米叶片为例，提出了利用 NURBS 插值结合使用多直线段分裂算法来重建玉米叶片的三维形态及对叶片曲面网格数目进行简化控制的方法，该方法简单易行。经实验分析表明，重建的玉米叶片三维形态具有较强的真实感效果，简化时，能使模型中的主要特征尽可能保留下来，能动态地满足可视化效果和计算效率之间的不同需求。本文提出的叶片形态建模与网格简化算法具有普适性，适合于其它禾谷类作物。

References

- [1] Lemeur R, Blad B L. A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies. *Agricultural Meteorology*, 1974, 14: 255-286.
- [2] Mariscal M J, Martens S N. Light-transmission profiles in an old-growth forest canopy: Simulations of photosynthetically active radiation by using spatially explicit radiative transfer models. *Ecosystems*, 2004, 7: 454-467.
- [3] Espana M L, Baret F, Aries F, Chelle M, Andrieu B, Prevot L. Modeling maize canopy 3D architecture application to reflectance simulation. *Ecological Modelling*, 1999, 122: 25-43.
- [4] 邓旭阳, 周淑秋, 郭新宇. 基于 Cardinal 样条插值和三角面片的叶片静态建模. *计算机工程与应用*, 2004, 25: 199-201.
Deng X Y, Zhou S Q, Guo X Y. A static leaf model based on cardinal spline and triangle faces. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 25: 199-201. (in Chinese)
- [5] 刘晓东, 蒋立华, 赵建军, 刘海岩. 基于 Bezier 曲线的植物形态建模和显示. *计算机工程与应用*, 2002, 13: 97-98.
Liu X D, Jiang L H, Zhao J J, Liu H Y. The modeling and display of plants based on the bezier curve. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 13: 97-98. (in Chinese)
- [6] 刘晓东, 曹云飞, 刘国荣, 胡昭. 基于 NURBS 曲面的水稻叶形态建模. *微电子学与计算机*, 2004, 21(9): 117-119.
Liu X D, Cao Y F, Liu G R, Hu Z. The modeling of rice leaf based on NURBS. *Microelectronics and Computer*, 2004, 21(9): 117-119. (in Chinese)
- [7] 赵春江, 郑文刚, 郭新宇, 王纪华. 玉米叶片三维形态的数学模拟研究. *生物数学学报*, 2004: 395-399.
Zhao C J, Zheng W G, Guo X Y, Wang J H. The computer simulation of maize leaf. *Journal of Biomathematics*, 2004: 395-399. (in Chinese)
- [8] Ross J. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dr. W Junk Publishers, The Hague, The Netherlands, 1981.
- [9] Chelle M, Andrieu B. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modelling*, 1998, 111:75-91.
- [10] Chelle M, Andrieu B. Radiative models for architectural modeling. *Agronomie*, 1999, 19:225-240.
- [11] 王锡平, 李保国, 郭焱, 翟志席. 玉米冠层内光合有效辐射三维空间分布的测定和分析. *作物学报*, 2004, 30: 568-576.
Wang X P, Li B G, Guo Y, Zhai Z X. Measurement and analysis of the 3D spatial distribution of photosynthetically active radiation in maize canopy. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30: 568-576. (in Chinese)
- [12] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术. 科学出版社, 2003: 152-168.
Zhu X X. *Modeling Technology on Free-Form Surface*. Beijing: Science Press, 2003: 152-168. (in Chinese)
- [13] 郑文刚, 郭新宇, 赵春江, 王纪华. 玉米叶片几何造型研究. *农业工程学报*, 2004, 20:152-154.
Zheng W G, Guo X Y, Zhao C J, Wang J H. Geometry Modeling of Maize Canopy. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20: 152-154. (in Chinese)
- [14] 王锡平, 郭焱, 李保国, 马焜涛. 玉米冠层内太阳直接辐射三维空间分布的模拟. *生态学报*, 25(1): 7-12.
Wang X P, Guo Y, Li B G, Ma Y T. Modelling the three dimensional distribution of direct solar radiation in maize canopy. *Acta Ecologica Sinica*, 25(1): 7-12. (in Chinese)

(责任编辑 郭震坤, 赵利辉)