

基于面积约束的大豆叶片三维建模方法

王静文¹ 刘弘²

(山东师范大学信息科学与工程学院 济南 250014)¹

(山东师范大学山东省分布式计算机软件新技术重点实验室 济南 250014)²

摘要 针对基于图像对大豆叶片进行三维真实感建模的问题,考虑叶面积指数对大豆产量的影响,提出一种受面积约束的三维叶片建模方法。该方法首先从二维图像中提取出叶片特征点和叶片面积,然后采用双三次均匀B样条曲面插值特征点进行建模,并且根据叶片边缘卷曲形态对网格模型进行变形,构造叶片卷曲模型,分别计算不同卷曲模型的最大光照面积,从而选择最优的模型。实验证明,该方法能构造出逼真的叶片模型,并且具有一定的生物学意义和实际应用价值。

关键词 特征点,曲线拟合,B样条曲面,面积约束,三维建模

中图分类号 TP301.6 文献标识码 A

Three-dimensional Modeling of Soybean Leaf Based on Area Constraint

WANG Jing-wen¹ LIU Hong²

(Department of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)¹

(Shandong Provincial Key Laboratory for Novel Distributed Computer Software Technology, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)²

Abstract Aiming at the realistic three-dimensional model of soybean leaf based on images, considering the impact of leaf area index(LAI) on soybean production, a method for three-dimensional modeling of leaf on the constraint of leaf area was proposed. Firstly, the feature points and leaf area were extracted from the image, and then the feature points were interpolated to get a bi-cubic uniform B-spline surface. The mesh was deformed according to the curl of leaf edge and the curly leaf model was constructed. Lastly, the maximum illumination area of each model separately was calculated to chose the optimal model. The experimental results show that the method can construct the realistic three-dimensional model of soybean leaf. The method has certain biological significance and application value.

Keywords Feature points, Curve fitting, B-spline surface, Area constraint, Three-dimensional modeling

1 引言

叶片是植物主要的光合器官,其生长规律对光能利用、干物质积累等有着重要作用。因此,模拟植物叶片生长具有重要意义。对植物叶片进行几何描述,实现真实感建模是数字植物和计算机图形学领域的研究热点,许多学者都对此做了研究^[1-4]。采用几何参数建立植物叶片模型时,由于受理论和方法的限制,只能对自然植物进行近似描述,其真实感不强。惟结合叶片特征参数才能构造出具有真实感的叶片模型。通过图像处理技术获得叶片特征可避免人工测量的复杂度,故基于这项技术的叶片建模方法是相关领域的热点问题。围绕数字图像建模问题,杨沛等^[1]采用椭球体表面投影和双曲抛物面投影方法模拟叶片的两种弯曲变形,但是这种变形没有生物学依据,不符合自然规律。苗腾等^[2]先对边缘轮廓进行卷曲,然后利用拉普拉斯变形技术计算其他网格点的位移,但只考虑了叶片边缘的变化,而对叶面的整体形态没有做平滑

转变处理。杨亮等^[3]利用机器视觉原理,从多幅叶片图像中重建三维模型。这种方法需要进行大量的特征匹配运算。赵春江^[4]将向量MB(叶子宽度)绕M旋转一定角度,并沿着叶脉走向移动而形成叶表面性状,这种做法没有考虑模型对叶片光合作用产量的影响。本文在二维建模的基础上,同时考虑叶片边缘的卷曲形态,实现了对叶片的三维变形,并结合生物学意义,利用面积对叶片三维建模进行约束,使叶片模型的受光面积最大,满足生物学上最优生产量的要求。

具体所做工作如下:

(1)提取出叶片图像的点作为特征点,并且按照原有的拓扑关系生成特征点坐标链表;(2)构造不同的叶片卷曲模型,并且分别计算它们最大光照面积,选择最优的叶片卷曲模型。

2 基本原理

2.1 三次均匀B样条曲线

B样条曲线具有局部性特征^[5],具体表现为k阶B样条

到稿日期:2012-12-22 返修日期:2013-03-11 本文受国家自然科学基金(60970004,60743010),山东省自然科学基金(ZZ2008G02,ZR2010QL01)资助。

王静文(1987-),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学、计算机软件与理论,E-mail:banban_0326@126.com;刘弘(1955-),女,博士,教授,主要研究方向为进化计算、CSCW。

曲线上参数为 $t \in [t_i, t_{i+1}]$ 的一点 $P(t)$ 至多能与 k 个控制顶点 $P_j (j=i-k+1, \dots, i)$ 有关, 与其它控制顶点无关; 移动该曲线的第 i 个控制顶点 P_i 至多影响到定义在区间 (t_i, t_{i+k}) 上那部分曲线的形状, 对曲线的其余部分不产生影响。B 样条曲线的这个特征有利于对其进行局部调节, 从而可以调整利用 B 样条曲线构建的叶片模型的几何形态。

当参数均匀分割时, 设 $n+1$ 个控制顶点 $P_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$, 节点矢量为 (t_0, t_1, \dots, t_n) , 则第 i 段三次均匀 B 样条曲线的定义为^[6]:

$$P_i(t) = \sum_{k=0}^3 N_{i,k}(t) p_i, t \in [0, 1] \quad (1)$$

对于给定的 $n+1$ 个数据点 $P_i, i=0, 1, \dots, n$, 将首末数据点 P_0 和 P_n 分别作为三次 B 样条插值曲线的首末端点, 把内部数据点 P_1, P_2, \dots, P_{n-1} 依次作为三次 B 样条插值曲线的分段连接点, 则曲线为 n 段。所求的三次 B 样条插值曲线的控制点 $V_i, i=0, 1, \dots, n+2$ 应为 $n+3$ 个。由于 B 样条的局部性, 一段三次 B 样条曲线只受 4 个控制点的影响, 因此获得 n 个分段曲线的起始点。根据式(1)可以推导出反求 B 样条控制点的公式如下:

$$\begin{cases} p_0 = V_0 \\ p_i = [B_i(u_{i+3}) B_{i+1}(u_{i+3}) B_{i+2}(u_{i+3}) B_{i+3}(u_{i+3})] \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix} \\ p_{n-1} = V_{n+2} \end{cases} \quad (2)$$

$i \in [1, n-1]$

该方程组有 $n+3$ 个未知数 P_j , 而方程的个数是 $n+1$ 个。因此, 还需补充 2 个端点条件, 对于 C^2 连续的三次 B 样条闭曲线, 首末数据点重合, 方程减少 1 个, 又因为首末 3 个控制点依次相重, 未知数减少了 3 个, 所以方程个数与未知数个数相同。

三次均匀 B 样条曲线是 B 样条曲线的一种特例, 不仅能满足处理一般问题的需要, 而且计算简便, 因此, 本文采用三次均匀 B 样条曲线来进行叶片轮廓的几何建模。

2.2 双三次均匀 B 样条曲面

给定 $M \times N$ 个控制顶点 $d_{i,j} (i=0, 1, \dots, M; j=0, 1, \dots, N)$ 的阵列, 构成一张控制网格; 又分别给定参数 u 与 v 的次數 k 与 l , 两个节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{M+k+1}]$ 与 $V = [v_0, v_1, \dots, v_{N+l+1}]$, 就定义了一张 $k \times l$ 次 B 样条曲面^[7]。其方程为:

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad (3)$$

$u_k \leq u \leq u_M, v_l \leq v \leq v_N$

式中, B 样条基函数 $N_{i,k}(u), N_{j,l}(v)$ 分别由节点矢量 U 和 V 按 de Boor-Cox 递推公式决定。本文采用双三次均匀 B 样条曲面, 即 $k=l=3$ 。

3 叶片特征点的选择

为了真实地反映叶片的特征, 选取叶片轮廓上的特征点

非常重要, 并且使用较少的控制点来勾画叶片型线可以提高工作效率^[8]。特征点是反映叶片外形特征的点集, 它的选取对曲线的插值拟合至关重要, 如果选择不合适, 不仅会增加迭代次数, 而且可能达不到要求的拟合精度。角点特征是图像的一种重要的局部特征, 一般定义为图像的边界曲率极值点或图像边界方向变换不连续的点。本算法将角点作为特征点, 在 HSI 空间的亮度分量 I 中利用 Harris 算子^[9] 提取图像目标的角点。将角点代入式(2)计算出控制点, 然后用三次均匀 B 样条曲线插值(见图 1)。具体算法如下:

(1) 根据叶片角点 C_i 反算出初始控制点 P_i , 并构造相应的三次均匀 B 样条曲线;

(2) 按照 Hausdorff 距离计算出各段 B 样条曲线与原始轮廓的拟合误差, 选出平均误差最大的区间段, 计算除去误差最大区间以外其他区间的平均误差, 并以此作为拟合标准误差;

(3) 在平均误差大于标准误差的区间段内增加特征点, 并重新进行三次均匀 B 样条拟合;

(4) 计算上述区间段与原始轮廓的拟合误差, 如果仍然大于拟合误差标准则继续执行(3), 直到各段的平均误差都符合拟合误差标准。

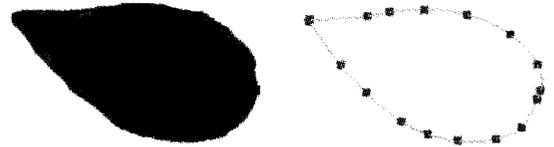


图 1 叶片轮廓

一个叶片轮廓就可以用一个角点的集合来表示, 本文将图 1 中的叶片 $L1$ 形式化地表示成 $L1 ::= \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{15}, P_{16}\}$ 。将所有角点按照拓扑关系生成坐标链表以后, 每一个坐标链表对应一个叶片, 每一个叶片轮廓通过一个坐标链表来存储。

4 植物叶片三维建模

4.1 叶片卷曲模型

基于图像处理技术的叶脉提取和叶脉建模已经成为一个单独的研究课题^[10,11], 也是相关领域的研究热点问题, 很多学者对此问题做了研究。为了研究方便, 本文在构建叶片三维模型时, 只考虑叶面空间模型, 不对叶片表面的叶脉及纹理进行模拟。在确定叶片轮廓特征点之后, 增加一定数量的叶面特征点, 然后用双三次均匀 B 样条曲面插值这些特征点对叶面进行建模。叶片中间是主脉, 为使曲面从边缘到主脉的过渡更加平缓, 在边缘特征点和主脉特征点之间选择了几组与主脉平行的点。

利用 B 样条曲面的性质, 可以将曲面反算问题化解为一系列曲线反算问题。即将曲面上的截面曲线的特征点看作位于各条控制曲线上的数据点, 就可反算出各条控制曲线的控制顶点, 这就是所要求的插值曲面的控制顶点。

选取边缘特征明显的 80 片叶片作为样本, 观察边缘卷曲

的形态,根据大豆叶片边缘的卷曲特征,将其卷曲形态抽象为2种基本形态:类似抛物线型和类似正弦曲线型。

从图像上获取的点都是二维点,而特征点的第三维坐标反映出叶片的卷曲形态。在叶边缘区域 L_j 中选取5个特征点 $p_i (i \in [1,5])$,通过参数改变 P_i 的Z分量坐标 $P_i(Z)$ (见图2)。

类似抛物线型:

$$\begin{cases} p_1(Z) = p_5(Z) = 0 \\ p_2(Z) = p_4(Z) = 0.75A \\ p_3(Z) = A \end{cases}$$

类似正弦曲线型:

$$\begin{cases} p_1(Z) = p_5(Z) = p_3(Z) = 0 \\ p_2(Z) = p_4(Z) = A \end{cases}$$

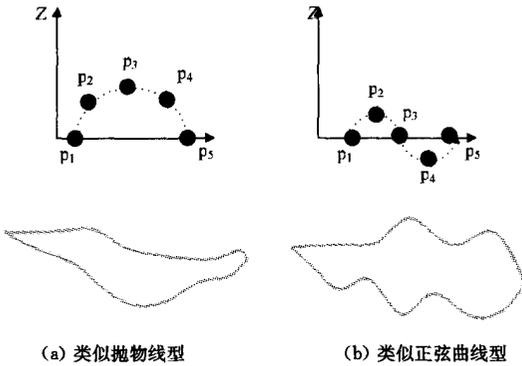


图2 叶片卷曲控制点

边缘卷曲只影响了边缘附近的叶片形态,而根据生物学规律,叶片的中心区域也会发生相应的卷曲。因此,边缘卷曲的形态会影响叶面中部的形态。定义叶片质心为构成叶片轮廓的所有像素点所在像素坐标的平均位置^[12]。设轮廓上的点为 $P_k(x_k, y_k), k=1, 2, \dots, n$,则质心坐标 $P_0(\bar{x}, \bar{y})$ 计算如下:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \\ \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \end{cases} \quad (4)$$

结合质心的叶片卷曲模型构建算法如下:

首先,假设各质点的重量一致,计算叶片轮廓卷曲后的质心坐标,这时计算出的质心坐标为三维坐标,增加了 \bar{z} 坐标, $\bar{z} = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k z_k$ 。

然后,将质心的改变作用于叶片模型。为了使叶片平滑弯曲,在质心发生改变后,需要对质心邻域的点做改变,以此类推,直到传播到叶片边缘B样条曲线为止。利用拉普拉斯变形技术^[13]计算网格的位移。首先将每个四边形划分成两个三角形,则定义在网格上的Laplacian微分坐标为:

$$\sigma_i = \ell(v_i) = \sum_{j \in N(i)} d_{ij}(v_i - v_j) \quad (5)$$

式中, ℓ 为Laplacian算子; $N(i) = \{j | \{i, j\} \in E\}$ 是顶点 v_i 的邻接顶点集; d_{ij} 代表了顶点 v_i 和 v_j 之间的权重关系,并满足

$$\sum_{j \in N(i)} d_{ij} = 1. \text{ 根据余切方案 } d_{ij} = \frac{1}{2A_i} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}), \text{ 其中 } \alpha_{ij}$$

和 β_{ij} 为边 v_{ij} 所在三角形上对应的角, A_i 为顶点 v_i 的近似Voronoi区域的面积。通过最小化能量方程 $\sum_{i=1}^n \| \ell(v'_i) - \sigma_i \|^2$ 来达到在变形中保持Laplacian坐标的目的。其中 v'_i 为变形后的顶点。变形后的叶片模型如图3所示。

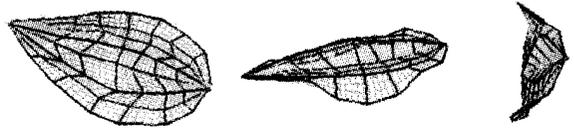


图3 叶面三维模型

4.2 面积约束叶片模型

叶面积指数LAI(Leaf Area Index)是指一定土地面积上植物叶片面积总和与土地面积之比,LAI在几何上定义成单位土地面积上进行光合作用的叶面积之和。

大豆单株叶面积与单株干物重积累有直接的相关性,单株叶面积越大则单株干物重也越高,单株产量也越高。农业研究表明^[14],大豆的结荚鼓粒期是光合产物积累和籽粒产量形成的旺盛时期,此时保持较高的LAI有利于干物质积累和经济产量的形成;大豆始花期正是结荚鼓粒早期,亦是结荚鼓粒、孕育籽实形成的关键阶段。并且,最大叶面积指数与产量的相关性也达到极显著水平,而最大叶面积指数就出现在始花期,同样说明了始花期LAI对产量形成是极重要的。假设对大豆始花期的叶片进行建模,这就要求LAI最大,即叶片接受光照的面积最大。

设 E_j 是光源 j 对叶片的光照能量, $I(E_j)$ 是光源 E_j 对于叶片的能量的贡献系数, $b_i = \sum_{E_j \in P_j} I(E_j) E_j$, b_i 是叶面 i 的光接收能量。这样光接收的能量将决定于叶片的面积大小。叶片的面积大小计算为:通过B样条型值点构成四边形网格,取四边形网格构成的面积来近似叶片的面积。首先,计算四边形面积。根据海伦公式,边长为 a, b, c, d 的四边形面积:

$$S = \sqrt{(p-a) * (p-b) * (p-c) * (p-d)} \quad (6)$$

式中, $p = (a+b+c+d)/2$ 。

然后,计算所有四边形的面积和。四边形网格面积的累加和应该逼近通过图像处理得到的叶片面积^[10],并且在一定精度范围内。

最后,求出每一个四边形网格的法向量。已知平面 Π 过三点 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$,则平面 Π 的法向量 \vec{n} 为: $\vec{n} = P_1\vec{P}_2 \times P_1\vec{P}_3$ 。因此可以计算得到每个四边形垂直于光线方向的面积。通过累加可以得到叶片的面积接收到的光源量:

$$E_i = \sum_{k=1}^n n_k(u, w) \times n_i s_k \quad (7)$$

式中, $n_k(u, w)$ 是曲面控制点四边形的对称中心法向量, n_i 是第 i 个光源与控制点四边形对称中心的连线方向矢量。 S_k 是控制点四边形形成的面积。

设定理想光源位置,分别计算叶片在不同卷曲形态下的最大光照面积(见表1),选择其中最优的一种卷曲形式。

表1 不同模型最大光照面积(像素)

编号	图像面积	面积	类似正弦型	类似抛物线型
1	81709	空间	83213	82120
		最大光照	77125.8	76963.6
2	73997	空间	75539	74295
		最大光照	70126.1	69941.3

从表1中可以看出,类似抛物线型叶片的面积更接近于图像面积,并且最大光照面积所占叶面积比例为93.7%和94.1%,而类似正弦型最大光照面积所占比例为92.7%和92.8%,因此类似抛物线型的叶片卷曲形态更有利于叶片接受光照,因此,选用类似抛物线型作为叶片建模的卷曲形态。同理,如果有其他卷曲形态,也可以通过这种方式进行比较。

5 实验

系统配置:CPU: Intel Core2 Duo, 2.20GHz, RAM: 2G; 操作系统为中文 Windows XP, 上述算法在 VS2003 和 OpenGL 图形引擎编程环境下实现。图4是抛物线型叶片网格模型图,根据表2记录的网格上特征点的坐标可以计算出每个四边形的面积,以特征点 $P_2, P_3, P_4, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{18}, P_{19}, P_{20}$ 构成的4个四边形为例,计算结果如表3所列,通过累加所有四边形面积近似计算出叶片的空间面积;计算出每个四边形的法向量,设定光照方向就可以计算出叶片的最大光照面积。

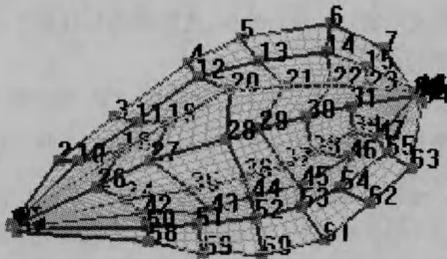


图4 叶片网格模型

表2 特征点坐标(像素)

序号	x	y	z
2	295	403	0
3	334	442	37.5
4	391	488	50
10	310	402	0
11	355	433	0
12	401	468	0
18	345	411	0
19	380	433	0
20	427	458	0

表3 叶面网格计算(像素)

a	边长			面积	法向量
	b	c	d		
15	54.6	43.91	66.69	1697.88	(1, 15, -16.64)
43.91	74.3	23.36	57.8	2127.5	(4, 3, 6.4, -3.944)
36.14	54.6	25	41.34	1421.85	(0, 0, 1)
25	57.8	27.85	53.23	1465.73	(0, 0, 1)

本文对叶片进行建模时,考虑了叶片空间形态对光照面积的影响,文献[2]在建模时没有考虑光照因素;将本文的模拟结果与文献[2]的模拟结果进行对比(如图5所示),可以看

出,本模型模拟的叶面部分变化自然(如图5(b)所示),而文献[2]方法模拟的叶面部分没有跟随边缘发生改变,叶片变形比较僵硬。



图5 模型对比

结束语 1)本文通过图像处理得到叶片特征点和叶片面积,进而构建大豆叶片的三维模型。

2)采用双三次均匀B样条曲面插值特征点构造出二维叶片模型,然后通过网格变形操作构造两种不同的叶片三维模型,即类似正弦曲线型和类似抛物线型,通过计算不同模型的最大光照面积,确定类似抛物线型是使叶面积指数最大的叶片模型。

本算法结合图像处理得到的叶片生物学特征构造叶片三维模型,具有一定的生物学意义。研究的下一步工作是模拟不同生长周期的叶片,并且考虑叶序的影响。

参考文献

- [1] 杨沛,何东健. 黄瓜叶片三维重建方法研究与实现[J]. 农机化研究, 2010, 32(7): 65-68
- [2] 苗腾,赵春江,郭新宇,等. 基于数据约束的黄瓜叶片参数化建模[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 171-176
- [3] 杨亮,郭新宇,陆声链,等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态的三维重建[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 141-144
- [4] 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(4): 493-496
- [5] 马士玲. B样条曲线节点插入算法研究及应用[D]. 开封:河南大学, 2009
- [6] 周红梅,王燕铭,刘志刚,等. 基于最少控制点的非均匀有理B样条曲线拟合[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 73-77
- [7] 林子植,潘日晶. 基于轮廓数据的B样条曲面重建[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(19): 59-62
- [8] 周文利. 基于B样条曲线的植物模型建立方法[J]. 计算机科学, 2007, 34(6): 245-247
- [9] Wang Jing-wen, Liu Hong. Measurement of Plant Leaf Area Based on Snake Model[A]//2012 International Symposium Information Technology in Medicine and Education, 2012[C]. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 1070-1074
- [10] 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
- [11] 李灿灿,孙长辉,王静,等. 基于改进的Sobel算子和色调信息的叶脉提取方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 196-199
- [12] 曾庆茂,林慧钦,朱同林. 基于小波描述子的叶片轮廓几何建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(12): 2046-2053
- [13] 许秋儿,谭光华,张三元,等. 保持几何特征的均值骨架子空间网格变形[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(3): 289-294
- [14] 黄春燕,刘胜利,王登伟,等. 大豆叶面积指数的高光谱估算模型研究[J]. 大豆科学, 2008, 27(2): 228-232