

基于参数化的玉米叶片三维模型主脉提取*

赵元棣 温维亮 郭新宇 肖伯祥 陆声链 孙智慧

(北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】 提取玉米叶片三维点云模型主脉对于建立真实玉米叶片模型具有指导意义。本文利用计算机图形学中的相关算法,包括离散网格的平均曲率计算、网格曲面的参数化以及点云数据的骨骼提取等,对扫描得到的玉米叶片三维点云模型进行主脉曲线提取。整个算法分为3步:不完整主脉三维点集提取、完整主脉点集提取和三维主脉重建。通过对不同种类玉米叶片三维扫描数据进行实验证明,该算法可以快速、准确地得到玉米叶片的主脉曲线。

关键词: 玉米 叶片 参数化 主脉提取

中图分类号: TP391.4; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0183-05

Midvein Extraction for 3-D Corn Leaf Model Based on Parameterization

Zhao Yuandi Wen Weiliang Guo Xinyu Xiao Boxiang Lu Shenglian Sun Zhihui

(Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

It is significant for constructing real corn leaf model by extracting midvein from 3-D point cloud model. Three algorithms, including curvature computation of meshes, parameterization of meshes and skeleton extraction of point cloud, were used to extract midvein from 3-D point cloud model. The whole algorithm was consisted of three steps, including incomplete 3-D point cloud extraction of midvein, complete point cloud extraction of midvein and 3-D midvein reconstruction. Through experiments on different kinds of corn leaves, it indicated that the proposed algorithm could extract the midvein of corn leaf faithfully with less runtime.

Key words Corn, Leaf, Parameterization, Midvein extraction

引言

叶片是植物的重要器官,也是植物模型建立以及生长模拟中必不可少的组成部分。植物叶片大小不同、形态各异,研究者很难设计出一种具有高度真实感、鲁棒性强和普适性好的叶片几何建模方法。然而,就某一具体植物物种来讲,叶片的形态表征还是比较明显的,一般具有稳定的形态特征,从中提取出这些特征可作为识别和分类植物的依据。脉序是叶片的主要特征之一,也是叶片形态结构的骨架,明确叶片脉序或主脉的形态特征是建立参数化、具有

较高真实感植物叶片三维模型的基础工作。

近年来,基于实测数据的植物真实感建模已经引起了越来越多的关注,其中基于真三维数据的植物几何建模已经成为虚拟现实技术领域中的一个重要研究方向。随着三维激光扫描设备性能的不断完善,日趋成熟的扫描技术已经成为三维建模的重要数据获取手段。三维扫描技术采用非接触主动测量方式直接获取高精度的三维数据,具有扫描速度快、实时性强、精度高、主动性强和全数字特征等特点,可以极大地节约时间,已被很多专家学者引入到植物形态数据的获取和几何建模中,为植物形态结构

收稿日期: 2011-06-29 修回日期: 2011-08-15

* 国家自然科学基金资助项目(30700493,31171454)和北京市农林科学院科技创新能力建设专项资助项目(KJCX201104011)

作者简介: 赵元棣,博士生,主要从事计算机图形学研究,E-mail: doppzyd@gmail.com

通讯作者: 郭新宇,研究员,主要从事数字植物理论技术研究,E-mail: guoxy@nrcita.org.cn

的三维重建提供了一个全新的思路^[1]。目前,基于真三维数据的植物几何建模研究仍处于发展阶段,且大部分研究都是针对树木的。Xu 等^[2-3]基于先验知识对扫描得到的树木点云数据进行建模,首先重构出树的整体骨架,然后通过异速生长理论计算出骨架节点的半径进而重构树干,最后再加入叶片,从而得到较逼真的树木模型。Zhu 等^[4]提出一种基于改进的阿尔法形状(alpha-shapes)建模,由扫描点云数据重建树冠。

目前,有关基于真三维数据的叶片形态几何建模方法并不是很多,主要集中于应用曲面插值拟合的算法近似得到叶片模型。Loch 等^[5-6]利用激光扫描仪获得叶片表面的大量数据点,分别通过线性三角网法和 CT(clough-tocher)技术对叶片进行精确建模。随后 Oguelat 等^[7]改进了 Loch 的方法,通过结合 CT 和 RBF(radial basis function)的方法获得了更加真实的叶片模型。然而,这些方法并没有利用叶片扫描数据提取主脉曲线,忽略了脉序作为叶片形态结构骨架的基本特征,易导致重建出的三维模型在应用于物理模拟或运动仿真中时出现违背叶片生理结构特征的极端情况。

本文以玉米叶片为例,通过离散网格的平均曲率计算、网格曲面的参数化以及点云数据的骨骼提取等步骤,提出一种提取玉米叶片三维模型主脉曲线算法。

1 算法结构

对于玉米叶片或整株的形态建模,国内外已经取得一定的研究成果^[8-9],本文着重于针对点云数据提取玉米叶片三维模型主脉曲线的算法研究。算法流程图如图 1 所示。整个算法分为 3 步:首先计算玉米叶片网格模型中每个顶点的曲率,将曲率大的顶点提取出来,并通过滤波操作进行去噪,得到不完整的主脉点集;然后将叶片网格模型参数化到平面,利用其对称性,对映射到二维不完整主脉点集进行最小二乘直线拟合,之后经过筛选产生完整的二维主脉点集;最后将其映射回原网格模型得到完整的三维主脉点集,利用骨骼提取算法结合一些平滑操作得到最终的主脉曲线。

2 数据获取与预处理

2.1 数据获取

利用美国 Polhemus 公司生产的 Fastscan 激光三维扫描仪(图 2a)对不同叶位的玉米叶片进行扫描,得到玉米叶片的三维点云数据(图 2b)。可看出在玉米叶片的点云数据中,有关主脉位置与特征的

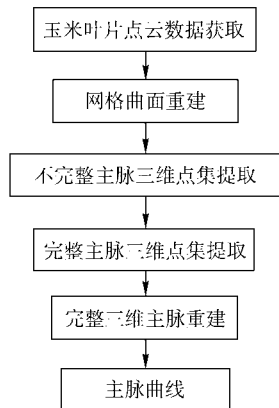


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

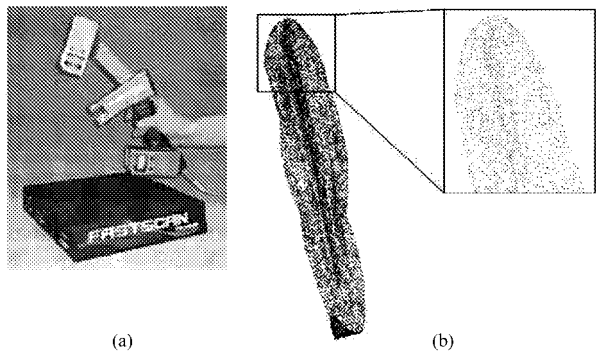


图 2 三维扫描仪与扫描点云数据

Fig. 2 3-D scanner and scanned point cloud data

(a) 三维扫描仪 (b) 扫描点云数据

信息量较小,叶尖部位的几何变化并不明显,给提取主脉带来了一定的困难。

2.2 数据预处理

对于一个玉米叶片的点云模型,首先需要对其进行一些预处理,以便得到质量较好的网格模型。由于玉米植株上不同叶片之间的间隙较大,利用扫描仪对其进行扫描相对容易,出现噪声的可能性比较小。若扫描结果中有少许噪声,可采用人工方法将其删除。随后,利用经典的泊松(Poisson)曲面重建算法^[10]对其进行三角网格重建,由于泊松重建方法是一种经典的隐式重建方法,可以在已知点云精确法向量的基础上,计算出一个能够刻画待重建曲面的特征函数,进而提取该特征函数的零等值面得到重建的网格。本文利用泊松重建方法得到质量较好的玉米叶片网格模型,如图 3 所示。

3 基于曲率的不完整主脉三维点集提取

网格曲面是一种离散的曲面表示,但是在三角网格上任一点处得到精确的曲率比较困难,主要原因是离散三角网格曲面并不是由传统微分几何中熟知的参数化方程和隐式方程来定义,而是由离散点云以及点与点之间的拓扑关系定义的。近年来,已

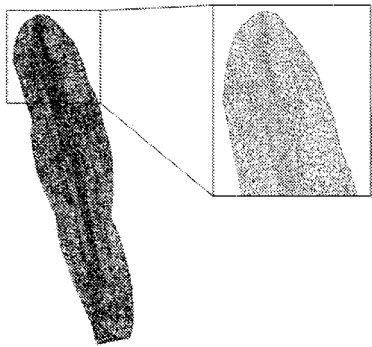


图 3 重建出的网格模型
Fig. 3 Reconstructed mesh model

有很多估算顶点曲率的方法,如欧拉公式、最小二乘估算方法^[11]、曲率张量估计方法^[12]、法曲率积分公式方法^[13]和离散微分几何方法^[14]。

观察玉米叶片的部分主脉在叶片上呈现“突起”的形状,对应到扫描后的点云模型上,表现在主脉部分的部分点集几何有明显的变化,其曲率相对于叶片其他位置点集较大。为此,首先计算网格模型中每个顶点的平均曲率,并通过事先给定的阈值将高曲率的点集提取出来形成不完整的主脉点集,记作 V_{3D} 。由于玉米叶片网格采样较为均匀,局部邻域性质较好,这里采用基于离散微分几何的计算网格曲率的方法^[14]。已知网格模型 M ,对于每个顶点 $x_i \in M$,其平均曲率为

$$K(x_i) = \frac{1}{2A} \left\| \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij})(x_i - x_j) \right\| \quad (1)$$

式中 $N(i)$ ——顶点 x_i 一环邻域的序号集合
 A —— x_i 点所对应的 Voronoi 面积
 α_{ij}, β_{ij} ——连接顶点 x_i, x_j 的边所对应的 2 个角(图 4)

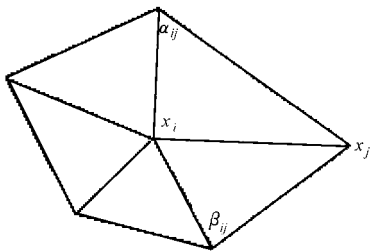


图 4 顶点邻域关系
Fig. 4 Neighborhood of vertex

由于受噪声等因素的影响,按照以上方法提取到的点集除了包括不完整的主脉点集之外,往往会出现一些离散分布的高曲率点(图 5a)。为了自动删除这些点,应用滤波方法对得到的高曲率点集进行自动筛选,从而得到只包含不完整主脉的点集。图 5b 所示为滤波后的主脉点集,可以看到不完整的主脉已经被提取出来,且没有其他噪声的影响。

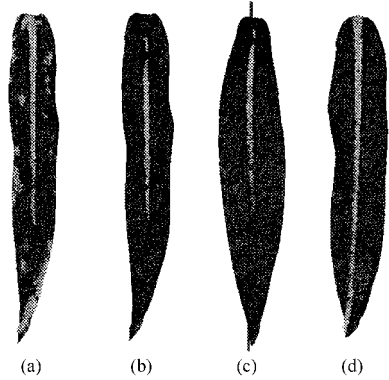


图 5 主脉提取过程
Fig. 5 Results of venation extraction process
(a) 高曲率点集提取 (b) 不完整主脉点集提取
(c) 平面最小二乘直线拟合 (d) 完整主脉点集提取

4 基于参数化的完整主脉三维点集提取

网格曲面的参数化是指通过分片线性映射得到一个与之同构的平面网格。其中分片线性映射是指给网格表面上的每个顶点在平面参数域内分配一个与之对应的参数坐标,而同构是指网格曲面和平面网格间存在着点、边以及面的一一对应关系,即网格曲面参数化的目的在于获得网格曲面与二维平面参数域的一个映射关系。一一对应的映射将一些原本对网格曲面的操作转换成对平面网格的操作,大大地减小了操作的复杂度,被广泛地应用于纹理映射、网格重新三角化以及曲面拟合,同样也广泛地应用于计算机视觉用来增强三维曲面的视觉效果。网格曲面参数化技术已经成为近年来相关领域中的研究热点^[15-17]。

考虑到玉米叶片整体的曲率变化不大,类似于一个平面结构,所以对其进行平面参数化,可将复杂问题转换为简单问题。利用 ABF (angle based flattening) 自由边界参数化方法^[17]对玉米叶片网格模型进行平面参数化,并将由第一步产生的不完整主脉三维点集对应到参数化后的二维网格上,记作 V_{2D} ,结果如图 5c 所示。ABF 自由边界参数化算法是通过求解一个约束优化问题得到参数化结果的,约束优化问题为

$$\begin{aligned} \min E(a) &= \sum_i \left(\frac{a_i}{a'_i} - 1 \right)^2 \quad (2) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} a_i \geq \varepsilon > 0 \\ a_i + b_i + c_i = \pi \\ \sum_i a_i = 2\pi \\ \prod \frac{\sin b_i}{\sin c_i} = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

式中 a_i 为待求的参数化后的角度, a'_i 为目标最优化

角度, a_i, b_i, c_i 构成 1 个三角形的 3 个内角。

由于前面利用曲率计算得到的三维主脉点集 V_{3D} 是不完整的, 只是真正主脉的一部分, 映射到平面的二维主脉点集 V_{2D} 也是不完整的。所以利用已有的部分主脉点集得到完整的主脉点集。考虑到玉米叶片是一个对称性的几何体, 其主脉在平面上可以近似地看作是一条直线, 即对称轴, 故通过对不完整的二维主脉点集 V_{2D} 进行最小二乘直线拟合, 得到的直线可以近似认为是二维叶片网格模型的主脉。图 5c 中直线表示的即为拟合得到的二维主脉直线。

对于平面网格上的每个顶点, 计算其与二维主脉直线的欧式距离, 若该距离小于设定的阈值, 则认为此点位于主脉点集中, 否则位于叶片其他部位。遍历平面网格上的每个顶点进行此操作, 最终得到平面网格上主脉的顶点集合 $\overline{V_{2D}}$ 。利用参数化得到的映射关系将这些完整的主脉点集映射回原叶片网格三维模型, 得到完整的主脉三维顶点集合 $\overline{V_{3D}}$, 如图 5d 所示。

5 基于骨骼提取的三维主脉重建

三维模型的曲线骨骼是一种重要的一维表示, 它直观地反映了模型的拓扑特征和主要的几何特征, 因此被广泛地应用于形状分析和处理之中, 如模型分割、目标匹配和检索、曲面重建和动画等^[18-20]。

前面得到的是主脉三维点集, 但是它并不具备一维结构, 无法指导玉米叶片重建。为此, 利用基于 Laplace 的点云收缩提取骨骼曲线的方法^[20], 对完整的主脉三维点集进行骨骼提取, 得到一维的主脉曲线。为了将 $\overline{V_{3D}}$ 收缩成为类似具有一维线性结构的点云, 最小化二次能量为

$$E(P') = \|W_L L P'\|^2 + \sum_i W_H^2 \|P'_i - p_i\|^2 \quad (3)$$

式中 L —— $\overline{V_{3D}}$ 所对应的 Laplace 矩阵

P' ——收缩后的三维点云

p_i, p'_i ——约束点

W_L, W_H ——收缩项与约束项所对应的权系数

然后, 利用最远点采样简化点云规模, 得到结点集合, 进而通过图建立及优化产生一维曲线, 最后通过 Laplace 平滑操作提高骨骼曲线的平滑性, 最终得到具有一定平滑性的一维主脉曲线, 如图 6 所示。

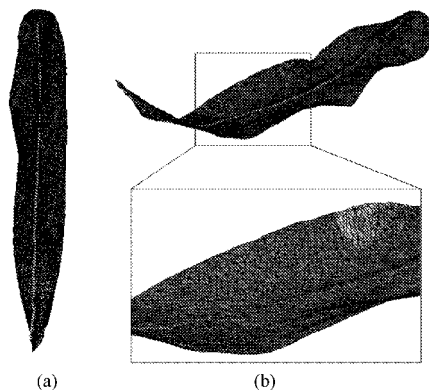


图 6 主脉重建结果

Fig. 6 Reconstructing results of venation

(a) 整条主脉曲线 (b) 局部主脉曲线

6 结束语

本文以玉米叶片为例, 提出了提取其主脉曲线的方法, 并通过不同玉米叶片三维扫描数据验证该算法的准确性和鲁棒性。实验证明本方法对于万级的三维点云数据只需在几秒之内就可以准确地计算出其主脉曲线, 而且提取到主脉曲线具有一定的平滑性。与已有的针对玉米叶片三维点云所设计的算法^[4-6]相比, 本文方法对于输入数据的质量要求较低, 可以是含有噪声或是少量缺失的点云。除此之外, 所提出的叶片主脉提取算法具有普适性, 可以平行推广到其他作物。

本文算法也有一定的局限性, 对于较大弯曲的玉米叶片模型, 可能会提取出错误的主脉曲线; 并且难以处理含有重度缺失、从而破坏了对称性的点云模型。

参 考 文 献

- 魏学礼, 肖伯祥, 郭新宇, 等. 三维激光扫描技术在植物扫描中的应用分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 373~377. Wei Xueli, Xiao Boxiang, Guo Xinyu, et al. Analysis of applications of 3D laser scan technology in plant scanning[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20): 373~377. (in Chinese)
- Xu Hui, Gossett Nathan, Chen Baoquan. Knowledge-based modeling of laser-scanned trees [C]// ACM SIGGRAPH 2005 Sketches. SIGGRAPH'05, New York, NY, USA: ACM, 2005: 124.
- Xu Hui, Gossett Nathan, Chen Baoquan. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(4): (19)1~13.
- Zhu Chao, Zhang Xiaopeng, Hu Baogang, et al. Reconstruction of tree crown shape from scanned data [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Technologies for E-learning and Digital Entertainment. Edutainment'08, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 745~756.
- Loch B I. Surface fitting for the modeling of plant leaves[D]. Brisbane: University of Queensland, 2004.

- 6 Loch B I, Belward J A, Hanan J S. Application of surface fitting techniques for the representation of leaf surfaces [C] // International Congress on Modelling and Simulation. Melbourne: MODSIM Press, 2005: 1 272 ~ 1 278.
- 7 Oqielat M N, Belward J A, Turner I W, et al. A hybrid clough-tocher radial basis function method for modeling leaf surfaces [C] // International Congress on Modelling and Simulation. Christchurch: MODSIM Press, 2007: 400 ~ 406.
- 8 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.
Zheng Wengang, Guo Xinyu, Zhao Chunjiang, et al. Geometry modeling of the maize leaf canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 152 ~ 154. (in Chinese)
- 9 肖伯祥, 郭新宇, 王纪华, 等. 玉米叶片形态建模与网格简化算法研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 693 ~ 697.
Xiao Boxiang, Guo Xinyu, Wang Jihua, et al. Maize leaf morphological modeling and mesh simplification of surface[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4): 693 ~ 697. (in Chinese)
- 10 Kazhidan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction [C] // Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing. SGP'06, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2006: 61 ~ 70.
- 11 Chen Xin, Schmitt Francis. Intrinsic surface properties from surface triangulation [C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 1992: 739 ~ 743.
- 12 Taubin G. Estimation the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation [C] // Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision, 1995: 902 ~ 907.
- 13 Watanabe K, Belyaev A G. Detection of salient curvature features on polygonal surfaces [J]. Eurographics, 2001, 20(3): 385 ~ 392.
- 14 Meyer M, Desbrun M, Schroder P, et al. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds [C] // Proceedings of Vis Math, 2002: 35 ~ 57.
- 15 Eck M, Deroose T, Duchamp T, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes [C] // Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH'95, New York, NY, USA: ACM, 1995: 173 ~ 182.
- 16 Floater M. Mean value coordinates [J]. CAGD, 2003, 20(1): 19 ~ 27.
- 17 Sheffer A, De Sturler E. Parameterization of faceted surfaces for meshing using angle based flattening [J]. Engineering with Computers, 2001, 17(3): 326 ~ 337.
- 18 Au O K C, Tai C L, Chu H K, et al. Skeleton extraction by mesh contraction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): (44)1 ~ 10.
- 19 Tagliasacchi A, Zhang Hao, Cohen-Or D. Curve skeleton extraction from incomplete point cloud [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): (71)1 ~ 9.
- 20 Cao Junjie, Tagliasacchi A, Olson M, et al. Point cloud skeletons via Laplacian-based contraction [C] // Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications, 2010: 187 ~ 197.

(上接第 178 页)

- 9 王挺, 王越超, 赵忆文. 多机构复合智能移动机器人的研制[J]. 机器人, 2004, 26(4): 289 ~ 294.
Wang Ting, Wang Yuechao, Zhao Yiwen. R&D of a multi mechanism compound intelligent robot[J]. Robot, 2004, 26(4): 289 ~ 294. (in Chinese)
- 10 黑沫. 可变形履带机器人设计与运动分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
Hei Mo. Design and motion analysis of a reconfigurable tracked mobile robot [D]. Changsha: National Defense Science and Technology University, 2010. (in Chinese)
- 11 张鹏. 基于多信息融合的轮式农业机器人导航研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
Zhang Peng. Research on navigation system of agricultural wheeled-mobile robot using multi-information fusion [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. (in Chinese)

(上接第 182 页)

- 12 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148 ~ 152, 162.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148 ~ 152, 162. (in Chinese)
- 13 刘俊, 陈无畏. 车辆电动转向系统的卡尔曼滤波模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 1 ~ 5.
Liu Jun, Chen Wuwei. Study on EPS using fuzzy and PID multi-mode control with Kalman filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 14 何卿. 基于多传感器融合的拖拉机行间导航系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
He Qing. Automatic guidance system for tractor inter-row operations based on multiple sensors [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)