# 基于坐标变换的玉米根茬三维模型建立

王继利 贾庆祥 杨新义

(吉林大学机械科学与工程学院,长春 130025)

【摘要】 提出了一种将玉米根茬结构离散化为多段根节,根据实测统计参数,以坐标变换为理论基础创建玉 米根茬随机三维模型的方法。创建模型过程中,采用 NURBS 曲线拟合的方法处理实测数据,分别以 NURBS 曲线 和 NURBS 曲面进行形态创建和表面创建。以 Matlab 软件、三维 CAD 软件为工具,以 IGES 文件为接口将创建的玉 米根茬模型导入三维 CAD 软件和有限元分析软件。所建模型可用于玉米根茬力学性能分析研究。

关键词:玉米根茬 三维模型 坐标变换 IGES 文件

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0158-06

# 3-D Modeling of Corn Root Based on the Coordinate Transformation

Wang Jili Jia Qingxiang Yang Xinyi

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

#### Abstract

Corn root is separated into a series of root elements. According to the statistical measured parameters, the random 3-D model of corn root was constituted based on coordinate transformation. In the model building, the measured data was fitted to NURBS curve, shape and surface of the model were expressed by NURBS curve and NURBS surface respectively. Matlab and 3-D CAD software were used as main tools. The model was saved in IGES file format which can be import into 3-D CAD software and FEA software for further analysis of mechanical properties of the corn root. The corn root modeling method is different in principle from the other existed methods and has great significance for mechanical analysis of the root system in the crop root treatment, plants reinforcement of soil and etc.

Key words Root element, 3-D model, Coordinate transformation, IGES file

## 引言

计算机图形技术的发展使得对农作物形态结构 的研究跨入到数字化和可视化的阶段,在计算机上 建立虚拟植物,以三维可视化的方式模拟、分析、研 究农作物的形态结构和生长过程已经成为可能。农 林植物生长建模与数字化技术研究已经成为当前农 业科技领域的热点之一<sup>[1]</sup>。根系是植物与土壤相 互作用的纽带。越来越多的事实证明根系构型是影 响农作物生产的基本因素。目前,国内外学者在根 系形态建模和可视化模拟方面做了较多的工作 <sup>[2-7]</sup>。主要侧重于植物模型的可视化,对能够应用 作者简介:王继利,博士生,主要从事数字化建模和数控机床可靠性研究,E-mail: wangjili1100@126.com

通讯作者: 贾庆祥,教授,主要从事数字化建模和数字化制造研究, E-mail: jiaqx@ jlu. edu. cn

收稿日期: 2011-01-26 修回日期: 2011-03-17

<sup>\*</sup>国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA043604)

型。本文基于此,建立一种更具备应用价值的根系 三维模型。

## 1 模型分析

玉米根系形态的骨架结构由主根和侧根组成, 其中侧根从上向下一般分为4级。为了简化模型, 模型的创建暂不考虑细小须根。主根和侧根视为管 形结构,其基本骨架形态由贯穿其中的轴线确 定<sup>[8]</sup>,主根和侧根的截面视为圆截面。以东北地区 某品种的玉米根茬为样本,统计根茬的相关参 数<sup>[9]</sup>,主要参数包括:主根长度及半径沿生长方向 的分布规律,各级侧根长度、数量及其半径沿生长方 向的分布规律。

根据根系结构,将整体模型分为主根模型和侧 根模型。每部分模型的创建过程又分为两步,即模 型形态创建和表面创建。模型创建过程中需要考虑 到实际根系的随机性。

## 2 模型算法推导

三维几何变换的基本内容包括平移变换、绕坐 标轴旋转变换、相对坐标点的比例变换,本文主要用 到前两种变换。

主根和侧根同样为管形结构,其模型创建方法 基本相同。为方便介绍模型创建过程,以单条侧根 为例介绍其创建方法。

#### 2.1 侧根形态

侧根生长形态由其轴线上的一系列特征点确 定。将侧根分节处理,每节侧根(根节)视为锥形圆 柱体。通过控制根节之间轴线夹角的随机性,模拟 侧根的实际生长形态。具体建模过程如下:

若以原点为第 n 段根节轴线的终点,以 Z 轴正 方向为其轴线方向,以球面坐标控制第 n +1 段根节 的生长方向和终点坐标,则第 n +1 段根节终点坐标 表示为

*θ*——*XOY* 半面内根节生长方同与 *X* 轴止方 向夹角

φ——根节生长方向与 Z 轴正方向夹角

令  $\theta$  取 值 范 围 为  $[0, 2\pi), \varphi$  取 值 范 围 为  $[0, \varphi_{e}], 则 \theta 与 \varphi$  将第 n + 1 段根节侧根的生长方 向约束在一锥形空间范围内,通过控制式(1)中角 度  $\theta$  与  $\varphi$  的随机性,可控制侧根的随机生长方向。

由于根节实际生长方向和起始点坐标是不断变

化的,需要根据第 n 段根节的生长方向(a,b,c)和 终点坐标,采用线性变换的方法确定出第 n +1 段根 节实际终点坐标。该线性变换方法主要分为两个步 骤,即分别经过图 1 所示的旋转变换和图 2 所示的 平移变换,图 2 中的点 M 为需要确定的终点坐标。

在图 1 中, D 点在坐标系 XYZ 中的坐标为 (0,0,d), D'点在坐标系 X'Y'Z'中坐标也为(0,0, d)。通过旋转变换将点 D 在坐标系 XYZ 中的坐标 线性变换为坐标系 X'Y'Z'中的点 D', D'在坐标系 XYZ 中的坐标为(a,b,c),则











令 *OD* 方向向量 *p* 为(0,0,*d*), *OD*'的方向向 量 *p*'为(*a*,*b*,*c*)。向量 *p*'需要通过旋转变换变换到 向量 *p* 的方向上,该变换与坐标系 *X*'*Y*'*Z*'到 *XYZ* 的 旋转变换一致。

首先将向量  $p'旋转 \alpha 角,转换至 XOZ 平面;再旋转 <math>\beta$  角转换到方向向量 p 上。即

$$(0,0,d,1) = (a,b,c,1)\boldsymbol{R}_{x}(\alpha)\boldsymbol{R}_{y}(\beta) \qquad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中 
$$\mathbf{R}_{x}(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
  
$$\sin\alpha = \frac{b}{\sqrt{b^{2} + c^{2}}} & \cos\alpha = \frac{c}{\sqrt{b^{2} + c^{2}}}$$
$$\mathbf{R}_{y}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\sin\beta = -\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad \cos\beta = \frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

则有

 $(a,b,c,1) = (0,0,d,1) [\mathbf{R}_{x}(\alpha)\mathbf{R}_{y}(\beta)]^{-1} \quad (3)$ 

式(3)中(*a*,*b*,*c*)相当于坐标系 *XYZ*中的坐标 (*x*,*y*,*z*),(0,0,*d*)相当于 *X'Y'Z'*中的坐标(*x'*,*y'*, *z'*)。因此,坐标系 *X'Y'Z'*与坐标系 *XYZ* 之间的坐 标变换关系为

 $(x,y,z,1) = (x',y',z',1) \left[ \boldsymbol{R}_{x}(\alpha) \boldsymbol{R}_{y}(\beta) \right]^{-1} \quad (4)$ 

图 1 中的 X'Y'Z'坐标系经过旋转变换,再沿 00'平移变换后其位置如图 2 所示。

图 2 中的平移变换矩阵为

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ a' & b' & c' & 1 \end{bmatrix}$$

最后,得出坐标系 X'Y'Z'与坐标系 XYZ 之间的 坐标变换关系为

$$(x, y, z, 1) = (x', y', z', 1) [\mathbf{R}_{x}(\alpha) \mathbf{R}_{y}(\beta)]^{-1} \mathbf{T}$$
(5)

假设第 n 段根节为图 2 中的 OO',第 n +1 段根 节为 O'M。根据式(1)可确定 M 点在坐标系 X'Y'Z' 中的坐标为(x'\_a+1, y'\_a+1),其中

$$\begin{cases} x'_{n+1} = d\cos\theta\sin\varphi \\ y'_{n+1} = d\sin\theta\sin\varphi \\ z'_{n+1} = d\cos\varphi \end{cases}$$
根据式(5),*M*点的实际坐标表达为

 $(d\cos\theta\sin\varphi, d\sin\theta\sin\varphi, d\cos\varphi, 1) [\mathbf{R}_{x}(\alpha)\mathbf{R}_{y}(\beta)]^{-1}\mathbf{T}$  (6)

由于玉米根茬侧根轴线不是折线,而是自然弯曲,因此可采用 NURBS 曲线来表示侧根的生长形态。

假设有一条长度 200 mm 的侧根,将其分为5 段 根节,即 d = 40 mm。 $\theta$  取值范围为 $[0,2\pi),\varphi$  取值 范围为 $[0,\varphi_c]$ ,取原点为起始点坐标。绘制出侧根 轴线形态如图 3 所示。

图 3 中,折线是根据式(6)求得的侧根轴线特 征点坐标绘制的;NURBS 曲线是根据特征点坐标, 运用 Matlab 中的 NURBS TOOLBOX 绘制的。

## 2.2 侧根表面

将侧根视为锥管形结构,其表面创建同样由一系列特征点确定。如图4所示,点N为侧根表面某一点。假设OO'为第n段根节,O'M为第n+1段根节。点N为第n段根节终点处截面圆上的一点,



点 N 在坐标系 X'Y'Z'中的坐标为 $(x'_n, y'_n, z'_n)$ ,其中

$$\begin{cases} x'_{n} = r\cos\theta \\ y'_{n} = r\sin\theta \\ z' = 0 \end{cases}$$
(7)

式中 r-----该截面圆相应的半径





采用同样的线性变换方法可依次确定出第 n 段 根节终点处截面圆上特征点的坐标表达式为

$$(x_n, y_n, z_n, 1) =$$

 $(r\cos\theta, r\sin\theta, 0, 1) [\mathbf{R}_{x}(\alpha)\mathbf{R}_{y}(\beta)]^{-1}\mathbf{T}$  (8)

对于上例中的侧根轴线形态,假设侧根根节横 截面直径沿侧根根节生长方向以等差数列分布,直 径分布范围为 0 ~ 6 mm。以 Matlab 中 NURBS TOOLBOX 中的 NURBS 曲面绘制功能重建的侧根 表面如图 5 所示。



#### 3 模型创建

由于实际测量技术的限制,同时为了简化获 取建模数据的难度,将模型数据分为测量数据和 随机数据两部分。测量数据包括模型的长度、直 径、各级侧根数量等。随机数据主要为主根和侧 根在生长方向上的角度变化。另外,假设所有玉 米根茬整体形态相似,即不同根茬之间的测量数 据部分存在同比例的放大或缩小关系,随机数据 部分具有相同的分布规律。以东北地区某品种的 玉米根茬为样本,统计玉米根茬的相关参数,包括 主根和各级侧根的生长规律,进行根茬模型的整 体创建。

#### 3.1 主根模型

主根测量参数主要包括主根长度和直径沿主根 生长方向的生长规律。随机参数为主根生长方向上 的随机角度。取某一根茬为例,将其主根平均分为 8段,分别测量出9个节点处主根直径数据如表1 所示。

表1 玉米根茬某一主根直径分布规律

| Tab. 1 | Diameter | distribution | of | one | taproot | of | a | corn |
|--------|----------|--------------|----|-----|---------|----|---|------|
|--------|----------|--------------|----|-----|---------|----|---|------|

| 节点 | 1     | 2     | 3      | 4       | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|----|-------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 根长 | 0     | 7.875 | 15.750 | 23. 625 | 31.500 | 39.375 | 47.250 | 55.125 | 63.000 |
| 直径 | 30. 9 | 30.2  | 29.1   | 27.3    | 25.3   | 22.6   | 19.1   | 12.0   | 0      |

将表1数据采用 NURBS 曲线拟合,得出主根直径 D 与长度 X 分布规律如图 6 所示。



Fig. 6 NURBS curve fitting for the taproot diameter

若根茬整体相似,则所有主根的直径与长度具 有同样的分布规律,则根据主根初始直径及其分布 规律即可完成主根的参数化建模。将根茬生长出一 级侧根处的直径称为主根初始直径,通过测量统计 一批某玉米品种根茬主根初始直径,其主要分布范 围为55~70 mm。

主根随机参数为主根生长方向上的随机角度。 主根每生长一段,生长方向会发生随机变化,随机角 度的取值范围为 $0 \sim \varphi_0$ 。根据主根的测量参数和随 机参数绘制的主根整体模型如图 7 所示。

### 3.2 侧根模型

将侧根根部的直径称为侧根初始直径。侧根测

量参数主要包括各级侧根 条数、最大初始直径、最小 初始直径、初始角度、各级 生长点位置以及侧根长度 和直径沿侧根生长方向的 生长规律。通过测量一定 数量的根茬,获得各级侧 根的测量参数值如表2所 示。取某一侧根为例,将 其平均分为12段,分别测 量出13个节点处侧根直 径数据如表3所示。



图 7 玉米根茬 主根模拟模型 Fig. 7 Simulation model of the corn taproot

表 2 玉米根茬各级侧根测量参数值 Tab. 2 Measuring parameters of lateral

root at various levels

| <del>余</del> 粉 | 各级侧根       |       |       |       |  |  |  |  |
|----------------|------------|-------|-------|-------|--|--|--|--|
| 参奴             | 1          | 2     | 3     | 4     |  |  |  |  |
| 主根比例           | 0          | 1/2   | 5/6   | 1/10  |  |  |  |  |
| 各级条数           | 20         | 18    | 10    | 6     |  |  |  |  |
| 最小直径/mm        | 4.8        | 4.4   | 3.9   | 3.2   |  |  |  |  |
| 最大直径/mm        | 6.4        | 6.2   | 5.6   | 4.6   |  |  |  |  |
| 初始角度/rad       | $0.35 \pi$ | 0.32π | 0.30π | 0.25π |  |  |  |  |

表 3 玉米根茬某一侧根直径分布规律

|      |      |      | Tab  | .3 Diai | neter dis | tribution | of one la | ateral roo | ot of a co | rn   |      |      | mm  |
|------|------|------|------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------|------|------|-----|
| 会粉   |      | 点节   |      |         |           |           |           |            |            |      |      |      |     |
| 参奴 - | 1    | 2    | 3    | 4       | 5         | 6         | 7         | 8          | 9          | 10   | 11   | 12   | 13  |
| 根长   | 0    | 20   | 40   | 60      | 80        | 100       | 120       | 140        | 160        | 180  | 200  | 220  | 240 |
| 直径   | 6.10 | 5.20 | 4.10 | 3.80    | 2.90      | 2.40      | 2.10      | 1.90       | 1.60       | 1.40 | 0.95 | 0.70 | 0   |

运用 NURBS 曲线拟合,得出侧根直径 d<sub>c</sub> 与长 度 X 分布规律如图 8 所示。

侧根随机参数为各级侧根生长方向上的随机角

度,即侧根每生长一段,生长方向角度会发生一定的随机变化。第*i*级侧根的随机角度取值范围为0~ $\varphi_i$ 。根据侧根的测量参数和随机参数绘制一条侧根

mm



图 0 网 化 直 任 州 0 和 15 西 3 18 日

Fig. 8 NURBS curve fitting for a lateral root diameter

的整体模型如图9所示。



Fig. 9 Simulation model of one corn lateral root

#### 3.3 整体模型

根据式(6)和式(8),将主根数据和各级侧根的 相关形态参数合并,分别绘制根茬骨架形态和模型 表面重建图如图 10 和图 11 所示。



图 10 玉米根茬整体模拟形态

Fig. 10 Simulation shape of one whole corn root



图 11 玉米根茬整体模拟模型 Fig. 11 Simulation model of one whole corn root

# 4 IGES 文件接口技术

IGES 格式文件为实现 CAD 或 CAM 系统间数 据交换的规范<sup>[10]</sup>, Matlab 软件不能直接生成 IGES 文件,为了将根茬模型导入到通用的 CAD 软件中, 以便进行进一步分析研究,需根据 IGES 文件数据 结构编写生成 IGES 文件的转换程序,通过调用该 程序将根茬模型转换成 IGES 文件,实现 Matlab 与 三维 CAD 软件之间的接口。

以 Matlab 为编程工具,经过 IGES 文件的转换

程序将玉米根茬三维模型的 NURBS 数据转换为 IGES 数据文件。将该文件导入 Pro/E 软件后得到 实体模型如图 12 所示。



图 12 玉米根茬整体 CAD 模型 Fig. 12 CAD model of the whole corn root

## 5 根茬有限元分析模型

有限元分析是解决力学问题中常用的方法,为 了推广本文建模方法的实用性,通过 Pro/E 与 ANSYS 软件的接口,将根茬三维模型导入到 ANSYS 软件中,利用其智能网格划分功能建立了有限元分 析模型,验证了该模型用于有限元分析的可行性。 图 13 为根茬模型导入 ANSYS 后网格划分的局部放 大图。



图 13 玉米根茬有限元模型 Fig. 13 Finite element model of the corn root

# 6 结论

(1)以玉米根系为例,在综合分析国内外研究 成果的基础上,提出了一种基于坐标变换的创建玉 米根茬模型的新方法。该方法根据随机变量控制根 的生长方向,模拟根系的空间生长形态,计算方法简 单实用。

(2)采用 IGES 格式文件实现了 Matlab 与三维 CAD 软件之间的联接,并可以将根茬模型导入 ANSYS 软件,进行网格划分,建立可进行力学性能 分析的有限元模型。

(3)根茬模型的建立对于根茬收获、根茬处理、 植物根系固土等技术的研究提供了技术平台。该模 型的建立,对于进一步研究根土复合体力学性能也 具有重要意义。 参考文献

- 侯加林,王一鸣,董乔雪,等. 虚拟植物生长的研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2004,35(3): 159~163.
   Hou Jialin, Wang Yiming, Dong Qiaoxue, et al. Research and development of virtual plant technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35 (3): 159~163. (in Chinese)
- 2 Adiku S G K, Braddock R D, Rose C W. Simulating root growth dynamics [J]. Environmental Software, 1996, 11 (1~3): 99~103.
- 3 Lynch J P, Nielsen K L, Davis R D, et al. SimRoot: modeling and visualization of root systems [J]. Plant and Soil, 1997, 188 (1): 139~151.
- 4 邓旭阳,周淑秋,郭新宇,等.玉米根系几何造型研究[J]. 工程图学学报,2004,25(4):62~66. Deng Xuyang, Zhou Shuqiu, Guo Xinyu, et al. Study on the geometry modeling for corn root system [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 25(4):62~66.
- 5 管建慧,刘克礼,郭新宇.玉米根系构型的研究进展[J].玉米科学,2006,14(6):162~166. Guan Jianhui, Liu Keli, Guo Xinyu. Advances of research on maize root system architecture [J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14 (6):162~166.
- 6 钟南,罗锡文,秦琴.基于生长函数的大豆根系生长的三维可视化模拟[J].农业工程学报,2008,24(7):151~154. Zhong Nan, Luo Xiwen, Qin Qin. Modeling and visualization of three-dimensional soybean root system growth based on growth functions [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(7):151~154. (in Chinese)
- 7 Han L, Gresshoff P M, Hanan J. Modeling root development with signaling control: a case study based on legume auto regulation of nodulation [C] // Proceedings of the 2009 Third Internatimel Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization, and Applications, 2010: 134 ~ 141.
- 8 赵春江,王功明,郭新宇,等.基于交互式骨架模型的玉米根系三维可视化研究[J].农业工程学报,2007,23 (9):1~6. Zhao Chunjiang, Wang Gongming, Guo Xinyu, et al. 3D visualization of corn root system based on interactive framework model [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23 (9):1~6. (in Chinese)
- 9 张吴平,李保国.均质壤土下玉米根系三维空间分布的模拟与参数分析[J].土壤学报,2007,44(5):949~955. Zhang Wuping, Li Baoguo. Simulation of spatial distribution and parameter analysis of maize root system in homogeneous loam soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (5): 949~955.
- 10 来新民,张大卫,文亚昕. IGES 接口的开发及被测曲面重构初探[J]. 河北工业大学学报,1996,25(3):14~18. Lai Xinmin, Zhang Dawei, Wen Yaxin. The developing of IGES interface and the preliminary studying of measured curved surface reconstruction [J]. Journal of Hebei University of Technology, 1996, 25(3):14~18. (in Chinese)

#### (上接第168页)

- 12 刘相滨,向坚持. 基于八邻域边界跟踪的标号算法[J]. 计算机工程与应用,2001,23(2):125~126. Liu Xiangbin, Xiang Jianchi. A labeling algorithm based on 8-connected boundary tracking [J]. Computer Engineering and Applications, 2001, 23 (2): 125~126. (in Chinese)
- 13 李先锋,朱伟兴,纪滨,等.基于特征优化和 LS SVM 的棉田杂草识别[J].农业机械学报,2010,41 (11):168~172.
   Li Xianfeng, Zhu Weixing, Ji Bin, et al. Weed identification based on features optimization and LS SVM in the cotton field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (11): 168~172. (in Chinese)
- 14 谢菲,陈雷霆,邱航.基于纹理特征提取的图像分类方法研究及系统实现[J].计算机应用研究,2009,26(7):2767~2770.

Xie Fei, Chen Leiting, Qiu Hang. Research of image classification method based on texture feature extraction and system to achieve [J]. Application Research of Computers, 2009, 26 (7): 2767 ~ 2770. (in Chinese)

15 Platt John C. Probabilistic output for support vector machine and comparisons to regularized likelihood methods [M] // Smola A J. Advances in Large Margin Classifiers, Cambridge, MA: MIT Press, 1999: 1 ~ 11.