

摇臂式喷头内流道曲面的逆向重构研究

徐琳^{1a,1b}, 韩文霆^{1b,2}

(1. 西北农林科技大学 a. 机械与电子工程学院; b. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 用线切割机床将雨鸟 30IBH 摇臂式喷头内流道切割成 a、b 两部分, 使三维光学扫描仪的投影光束能够到达其表面进行多视扫描, 获取不同视角下流道 a、b 的点云数据。去除多视点云中的噪声后, 用三点法拼接多视点云, 得到流道 a、b 的点云数据; 再将流道 a、b 的点云数据拼接成喷头内流道的点云数据; 采用弦偏差采样法将点云数据精简后, 用基于边的方法把点云分割成喷管和小喷嘴两部分, 选择非均匀有理 B 样条 (NURBS) 模型分别按照点-线-面的顺序进行曲面重构。曲面重构的精度分析结果表明, 最大几何误差为 0.292 9 mm, 平均几何误差为 0.076 2 mm, 满足预期的精度要求, 实现了摇臂式喷头的内流道曲面重构。

关键词: 喷头; 流道; 逆向工程; 点云; 曲面重构

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2011)10-0047-04

0 引言

喷灌是一种高效的节水灌溉技术, 具有节水、增产、灌水均匀、节省劳力、适用范围广、易于实现机械化和自动化等优点。喷头是喷灌系统的关键部件, 其中又以摇臂式喷头的应用最为广泛。如何开发出性能优良的喷头一直是喷灌研究的重点。以往的喷头开发都是先完成设计, 再反复进行试制、试验和修改, 直到结果满意为止, 此过程耗费大量的时间和财力。计算流体力学 (CFD) 理论的快速发展及其应用软件日趋成熟, 为喷头的设计及试验过程提供了一种高效数值模拟方法。要对喷头的工作性能进行数值模拟研究, 首先要获得喷头流道的精确几何模型。逆向工程是一种常用的建模方法, 借助三维光学扫描仪系统和逆向工程软件, 可以快速地建立起喷头内流道的三维几何模型。

1 喷头切割与三维扫描

选择雨鸟 30IBH 摇臂式喷头进行内流道的逆向工程建模。喷头内流道呈弯管形状, 扫描仪的投影光束无法直接到达, 为了解决这个问题, 将喷头所有零件

拆卸后所得到的喷头流道在线切割机床上切割成 a 和 b 两部分。由于喷头的材质是黄铜, 颜色较深, 直接扫描效果不佳, 通过喷涂显影剂 (DPT-5 着色渗透显影剂) 的方法可以提高扫描质量。喷涂显影剂后的流道 a 和流道 b 如图 1 所示。

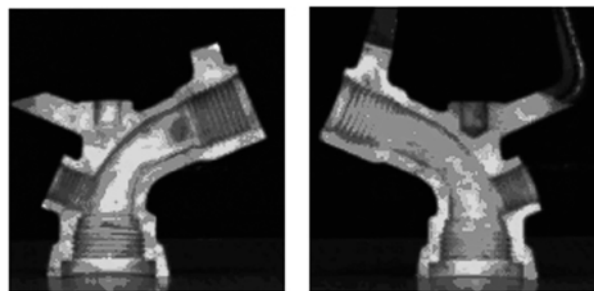


图1 喷涂显影剂后的流道 a(左) 和 b(右)

试验用的扫描设备为北京博维恒信公司生产的 3D CaMega CS-400 型三维扫描仪, 在景深为 120mm 范围内的测量精度为 0.03mm。经过多次扫描发现, 喷头的流道 a 和流道 b 都无法通过一次扫描获得完整的点云, 所以要进行多视扫描来减少扫描的盲区和死角, 获取流道曲面各个区域的点云数据。图 2 所示为扫描喷头流道 a 和流道 b 所获得的多视点云中的单片点云。

2 喷头内流道曲面点云数据拼接

2.1 点云数据预处理

多视扫描得到的点云数据很多, 但不是每一片都有用, 在尽可能拼接出流道 a 和流道 b 完整点云数据

收稿日期: 2011-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51079140); 西北农林科技大学基本科研业务费项目 (Z109021008)

作者简介: 徐琳 (1987-), 男, 江西铜鼓人, 硕士研究生, (E-mail) xulin0725@163.com。

通讯作者: 韩文霆 (1972-), 男, 内蒙古五原人, 副教授, 博士生导师, (E-mail) hanwt2000@126.com。

的前提下,选定所需的点云。为了提高喷头内流道点云数据的精度,选定点云的片数要尽可能少,因为两片点云进行拼接时,会产生一定的误差,拼接的次数越多产生的误差累积就越大,点云的精度也就越低。在 CloudForm 软件中,将选定的点云放大或旋转,去除流道边界、扫描不完全区域的杂点和失真点及其它不属于喷头流道的杂点,为点云的拼接做准备。

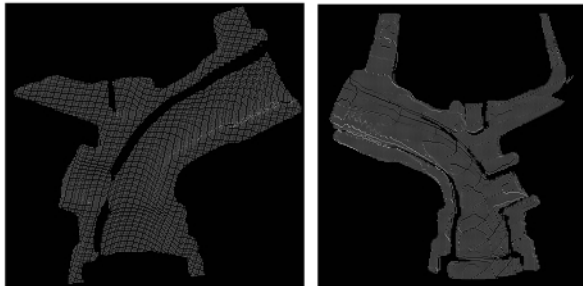


图 2 多视点云中的单片点云

2.2 点云的拼接

多视扫描得到的多视点云数据分别位于不同的坐标系中,要得到喷头流道 a 和流道 b 的点云,必须将多视点云统一到同一个坐标系中,这个过程称作点云数据的拼接。由于拼接时数据点集只存在坐标变化,不发生形状变化,因此多视点云的拼接可以看作空间两个刚体的坐标转换^[1]。点云拼接的形式有“片与片”、“组与组”两种,先分别对喷头流道 a 和流道 b 的多视点云进行片与片拼接,拼接成的流道 a 和流道 b 的点云再进行组与组拼接,就得到了喷头内流道的点云数据。拼接的方法为三点法^[2-5],即利用喷头流道本身的几何特征在拼接的两片点云数据的重合部分上找到至少 3 对对应点,进行最佳拼接,在(如图 3 所示)的“精拼参数”对话框中,通过修改精拼标准、最大距离、约束调节和循环次数,反复进行拼接。

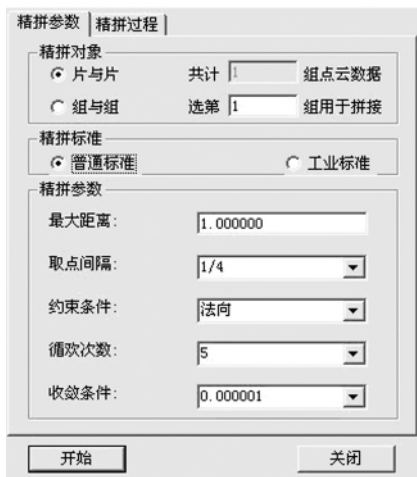


图 3 精拼参数对话框

当图 4 所示的“精拼过程”对话框中的距离方差

不再变小且在某一范围内跳动时,即到达了拼接的极限。此时放大点云,观察两片点云的重合区域的拼接情况,当重合区域的重合度较好时就认为拼接完成。拼接出流道 a 和流道 b 的点云数据后,用同样的方法将它们进行“组与组”拼接,就获得了喷头内流道的点云数据,将其导出为 IGES 格式文件,并导入 Imageware 软件中。



图 4 精拼过程对话框

在 Imageware 中,将喷头内流道点云数据调整到一个的合适位置,便于后期对点云进行处理,提高建模的效率。先在 XY 平面上创建一个工作平面 WorkPlane,将喷头流道切割平面部分点云析出,构建一个平面 Plane,对齐 Plane,使之与 WorkPlane 重合后删除 Plane,WorkPlane 即 XY 平面就成了喷头流道的切割平面。调整喷头流道入口的轴向使之与 Y 轴正方向平行。调整后的点云如图 5 所示。图 5 中,喷头内流道点云的切割平面为 XY 平面,喷头入口的轴向为 Y 轴正方向。

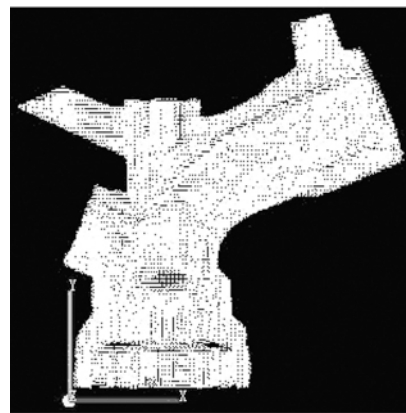


图 5 在 Imageware 中对齐后的点云

2.3 点云数据的精简

直接用扫描得到的点云数据进行曲面重构,会使计算机的运行效率变低,存储空间增大,生成曲面模

型需要消耗大量的时间,且影响重构曲面的光顺性。因而提取点云数据中反映曲面形状的点,去除大量冗余数据点,即对测量数据进行精简,有助于提高建模效率和建模质量^[3]。在进行数据精简前,先要删除不参与喷头内流道曲面重构的内流道切割平面点云。Imageware 中常用的数据精简方法有均匀采样(Sample Uniform)、弦偏差采样(Chordal Deviation)和间距采样(Space Sampling)。选用弦偏差采样法进行数据精简,因为它在大量精简数据的同时可以准确地保留高曲率变化区域的特征点以及边界点^[6-7],数据精简的结果如图6所示。由图6可以看出,点云数据减少了62%,点的个数从37313减到了14162。

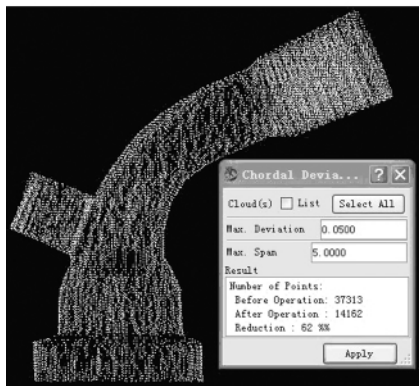


图6 弦偏差采样法精简喷头流道点云数据

3 喷头内流道曲面重构

3.1 点云数据的分割

在进行曲面重构之前,还要进行的重要工作是点云数据的分割。点云数据的分割是根据组成实物外形曲面的子曲面类型,将属于同一类的子曲面分割成一组。分割的方法分为基于测量的分割和自动分割两种。自动分割包含基于边(Edge-Based)和基于面(Surface-Based)两种基本方法,其中基于边的方法适用于包含二次曲面的实物外形,但不适用于自由曲面^[1]。根据喷头内流道点云数据的特征,选择基于边的方法将喷头流道的点云数据分割为小喷嘴和喷管两部分,再分别进行曲面重构。

3.2 曲线的拟合

按照点-线-面的顺序重构曲面,先要获得拟合曲线的点,通过在点云数据上构建出一系列的剖面(Cross Section)可以获得所需的点。构建剖面时必须注意,在喷管的几何特征变化明显的地方必须构建剖面,如在喷头的大喷嘴处的螺纹必须在每个大径和小径都构建剖面,而在几何特征变化平缓的地方可以等距地构建若干剖面,从而保证构建出的曲面能够完整地反映原喷管的几何特征。

得到了所需的点,下一步就是将这些点拟合曲线。NURBS 是国际标准化组织(ISO)规定的定义工业产品几何外形的唯一数学方法,它统一了 Bezier、有理 Bezier、均匀 B 样条和非均匀 B 样条曲线,不仅可表示自由曲线曲面,还能表示圆锥曲线和规则曲面。因此,本文将得到的点云拟合为 NURBS 曲线。在符合精度要求的一般情况下,优先拟合为二次曲线,对于一般曲线的拟合,要求误差不超过 0.5mm^[8]。此处拟合出的曲线用于构造曲面,为了提高曲面的精度,把误差上限设为 0.2mm。剖面点云的拟合曲线如图7所示。观察发现,剖面面所包含的点云都呈环形,所以先将点云拟合成圆(fit circle),然后分析曲线与点云误差(cloud difference)。当误差在 0.2mm 范围内时,即认为它符合精度要求;如果误差超过 0.2mm,再拟合成椭圆(Fit Ellipse),同样分析曲线与点云的误差,小于 0.2mm 时符合要求;如果拟合成椭圆时误差仍大于 0.2mm,则依公差构造曲线(Fit curve to Tolerance)。结果表明,此处所有的剖面点云都可以拟合成圆或椭圆。

NURBS 曲线的定义^[9]为

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u) W_i V_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u) W_i} \quad (1)$$

式中 V_i —控制顶点;

W_i —权因子;

$B_{i,k}(u)$ — k 次 B 样条基函数。

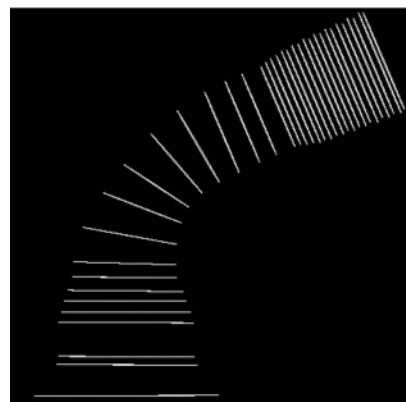


图7 剖面点云的拟合曲线

目前,曲面重构的方法主要有两种:一是以 B 样条和 NURBS 曲面为基础的曲面重构方法;二是以三角 Bezier 曲面为基础的方法。B 样条及 NURBS 曲面表示是目前成熟的商品化 CAD/CAM 系统中广泛采用的曲面表示方法,这类曲面可以应用四边参数曲面片插值、拉伸、旋转、放样、扫掠、混合和四边界方法构

造,在此基础上已经形成了一套完整的曲面延伸、求交、裁剪、光滑拼接及曲面光滑等算法。三角形 Bezier 曲面方法对点云数据非常密集,且曲面对象边界和形状极其复杂时有较好的适应性^[1]。此处选择以 B 样条和 NURBS 曲面为基础的曲面重构方法,用拟合出的曲线来构建喷管的 NURBS 曲面,如图 8 所示。



图 8 喷头内流道的重构曲面

3.3 曲面重构 NURBS 曲面的定义^[9]为

$$P(u, w) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,l}(w) W_{i,j} V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,k}(u) B_{j,l}(w) W_{i,j}} \quad (2)$$

式中 $V_{i,j}$ —控制顶点;

$W_{i,j}$ —权因子;

$B_{i,k}(u)$ —沿 u 向的 k 次 B 样条基函数;

$B_{j,l}(w)$ —沿 w 向的 l 次 B 样条基函数。

u 向和 w 向的节点矢量分别为

$$U = [0 = u_0 = u_1 = \dots = u_k \quad \mu_{k+1} \quad \dots \quad u_{r-k-1} \quad \mu_{r-k} = u_{r-k+1} = \dots = u_r = 1]$$

$$W = [0 = w_0 = w_1 = \dots = w_l \quad \mu_{l+1} \quad \dots \quad w_{s-l-1} \quad \mu_{s-l} = w_{s-l+1} = \dots = w_s = 1]$$

其中,沿 u 向和沿 w 向节点矢量的节点数分别为 $r+1$ 和 $s+1$, $r = n + k + 1$, $s = m + l + 1$ 。

4 曲面重构的精度分析

对重构曲面与点云数据进行误差分析,分析结果的彩色图谱如图 9 所示。重构曲面与点云的几何误差 (Euclidean) 的最大值、平均值、标准差分别为 0.292 9, 0.076 2, 0.054 0mm, 一般正 (Pos. Norm.)、反向 (Neg. Norm.) 误差最大值、平均值、标准差分别为 0.290 5, 0.075 2, 0.053 5mm 和 -0.292 9, -0.077 1, 0.054 2mm。此外,将喷头内流道重构曲面与喷头实体进行测量,测量结果显示:重构曲面与喷头实体的喷头入口直径分别为 21.2mm 和 21.1mm,喷头出口直径分别为

13mm 和 13.3mm,小喷嘴出口直径为 8.5mm 和 8.7mm,可见重构曲面与喷头实体的误差不大。误差来源主要有:喷头内流道直接由铸造成型,表明不是光滑曲面;受设备的精度与环境因素等的影响,三维扫描所得到的点云本身具有一定的误差,再经过多次的点云拼接,会产生误差积累;喷头入口及小喷嘴处均有螺纹,但受三维扫描仪精度的限制,没有在喷头内流道的点云中得到反映,这也增大了重构曲面的误差。与三维扫描仪 0.03mm 的测量精度相比,喷头流道与点云的最大误差不超过 0.3mm,平均误差不超过 0.08mm,在合理的范围之内。

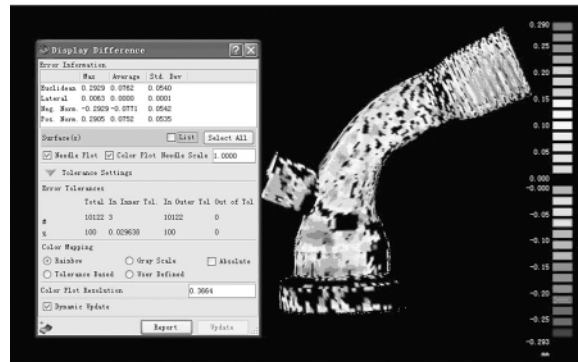


图 9 喷头流内道重构曲面与点云的误差分析结果

5 结论

应用逆向工程的方法对喷头流道进行建模,构建的曲面与点云的最大误差为 0.292 9mm,平均误差为 0.076 2mm,满足预期的精度要求。对喷头内流道的重构曲面与喷头实体分别进行了关键尺寸的测量,结果表明,重构曲面与实体相差不大。用逆向工程的方法重构喷头内流道曲面是一种新的尝试。根据误差分析可知,通过采用效果更好的三维扫描仪一次扫描获得流道 a 和流道 b 的完整点云数据,减少点云拼接次数,降低点云拼接所产生的误差等措施,可以提高喷头内流道的点云数据的精度,从而获得更加完整精确的喷头内流道几何模型,用于后续的喷头流道 CFD 数值模拟研究。

参考文献:

- [1] 金涛,童水光. 逆向工程技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 张舜德,卢秉恒,丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. 中国激光,2001,28(6):533-536.
- [3] 徐尚. 三维点云数据拼接与精简技术的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
- [4] Chu Song Chen, Yi Ping Huang, Jen Bo Cheng. A fast automatic method for registration of partially-overlapping range images[C]//

(下转第 74 页)

Design of High Speed Precision Machine's Travel Distance Sensor

Liu Chunxu , Cheng Rui , Sun Wenfeng

(Scientific Research Institute of Agricultural Mechanical Engineering in Heilongjiang , Harbin 150081 , China)

Abstract: In order to fully monitoring high speed precision machine , need to the homework between unit area rate , rice grain number and total amount of fall design , which will require accurate measurement machine marching distance. The commonly used method has benchmarking method , the wheel sensor velocimetry method , doppler radar guns method and GPS velocimetry method , etc. Therefore , on the analysis on the basis of the above methods advantages and disadvantages SCA620 proposed to uniaxial acceleration sensor and array type omnidirectional mercury switch to detect components , combined with single-chip microcomputer and wireless data transmission technology of the new design.

Key words: high speed precision machine; velocity measurement; SCA620; omnidirectional mercury switch; microcontroller

(上接第 50 页)

ICCV'98 Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision ,1998: 242-248.

- [5] Chu Song Chen ,Yi Ping Huang ,Jen Bo Cheng. Ranasac - Based Darces: a new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images [J]. IEEE Tansactions on Pattern Analysis and Maching Intelligence ,1999 ,21 (11) : 1229-1234.

- [6] K H Lee , H Woo ,T Suk. Point data reduction using 3D

grids [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2001 ,18: 201-210.

- [7] K H Lee ,H Woo ,T Suk. Data reduction methods for reverse engineering [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2001 ,17: 735-743.

- [8] 单岩 ,谢斌飞. Imageware 逆向造型应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社 2007.

- [9] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术 [M]. 北京: 科学出版社 2000.

Abstract ID: 1003-188X(2011) 10-0047-EA

Surface Reconstruction of Internal Runner of Impact Sprinkler Using Reverse Engineering Methods

Xu Lin^{1a ,1b} ,Han Wenting^{1b ,2}

(1. Northwest A & F University a. College of Mechanical and Electric Engineering; b. Institute of Water Saving Agriculture in Area Regions of China , Yangling 712100 ,China; 2. Institute of Soil and Water Conservation , Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources , Yangling 712100 ,China)

Abstract: In order to get the point clouds of internal runner of RainBird 30IBH impact sprinkler by 3D laser scanner ,using a linear cutting machine , cut the runner into two parts so that the laser beams can arrive. Then scan the two parts and get their multi-view point clouds separately. Using three control points method to register multi-view point clouds after noise filtering to get the point clouds of the two parts. Then , get the point cloud of internal runner of sprinkler by registering the point clouds of the two parts. Reducing data of the point cloud by chordal deviation method before Edge-Based data segmentation and NURBS surfaces reconstruction. There is surface of the runner of sprinkler after trimming and merging the surfaces. Evaluate the difference between reconstructed surface and point clouds , the result shows that the max and average Euclidean difference is 0.29mm and 0.07mm ,this matches expectations.

Key words: sprinkler; runner; reverse engineering; point clouds; surface reconstruction