

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.004

基于激光点云数据的糙米表面三维模型重建

Reconstruction of surface 3D model of brown rice based on point cloud data

吴婧 汤晓华 杨泗苹 安嘉强 李天骄 杨金山

WU Jing TANG Xiao-hua YANG Si-ping AN Jia-qiang LI Tian-jiao YANG Jin-shan

(北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048)

(School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing, 100048, China)

摘要:针对糙米的形态结构特征,运用非接触式激光扫描测试技术,以变截面环形扫描的方式获取糙米表面的原始点云,对原始点云进行法向量估计和光顺滤波等处理;利用泊松重建算法原理对光顺后的具有法向信息的点云进行模型重建,得到理想的糙米表面三维模型。结果表明,重建的糙米模型表面光滑,轮廓清晰,且米沟、胚芽等细节特征明显,可为后期研究提供有效的数字化模型。

关键词:糙米;点云;激光扫描;光顺滤波;泊松重建

Abstract: In view of the morphological and structural characteristics of brown rice, use the non-contact laser scanning technology to acquire original point cloud on brown rice surface in the multi-section circular scanning way. The Poisson reconstruction algorithm is used to reconstruct the smoothed point cloud with normal information to obtain the ideal three-dimensional model of brown rice surface. The results show that the reconstructed brown rice model has smooth surface, clear outline, and obvious details such as rice ditch and germ, which can provide an effective digital model for the later improvement of rice processing technology.

Keywords: brown rice; point cloud; laser scanning; smoothing; Poisson reconstruction

精白米在营养结构上的不足已逐渐引起人们的重视,大米营养强化已成为中国大米加工业亟待解决的问题。糙米是稻谷脱去外保护皮层稻壳后的颖果,与普通精致白米相比,糙米含有丰富的维生素、矿物质与膳食纤维,被视为一种绿色的健康食品。根据 GB/T 5502—2018《粮油检验 米类加工精度检验》标准,大米的营养成分随着加工程度的深入而改变,因此建立糙米的三维模

型对研究如何改善稻米的加工工艺尤为重要。

目前对于农作物表面轮廓建模的研究^[1]主要分为两种:基于图像进行边缘轮廓检测^[2-3]和基于三维点云数据几何建模^[4-5]。由于糙米具有胚芽和米沟等表面变化复杂的部分,利用图像进行边缘检测来重建的糙米模型精度较低,仅能反映糙米的整体形态特征,无法描述其具体的细节特征,因此采用激光扫描技术来获取糙米表面的点云数据并进行处理。孔祥亮等^[6]曾利用椭圆拟合的方法对糙米进行了模型重建,重建出了糙米的基本模型,但对于米沟、胚芽等细节部分描述有待提高。在此基础上,试验拟利用泊松重建原理重建细节特征明显的糙米表面三维模型,以期研究糙米在加工过程中的运动与受力情况提供精确的三维数字化模型,进而为改善稻米的加工工艺,提高稻米的生产质量提供支撑。

1 糙米表面三维点云数据获取

通过激光扫描技术,能够快速地获取目标物表面空间点的坐标信息。检测技术根据是否与被测物表面接触分为接触式测量和非接触式测量两种测量方式。接触式测量具有准确和可靠的优点,但测量速度慢,且不适用于软质、易碎、易变形的被测物体,对被测物的尺寸也有限制,难以测量小于测量头直径的微细部分。非接触式测量具有速度快、自动化程度高、不受被测材质限制等优点,但容易受被测物体反射情况和外界光源影响。由于糙米表面有米沟、胚芽等复杂曲面,且体积微小,结合其结构特点,试验利用以 KEYENCE LK-G150 感测头、KEYENCE LK-GD500 控制器为核心部件的非接触式激光扫描测量系统进行数据采集。图 1 为糙米表面数据检测示意图,将糙米视作回转体,沿长轴方向分成多个等距截面,以环形扫描的方式(细分间隔为 1°)扫描糙米的各个截面,每个测量点采集 100 个数据,以数据的平均值作为各测量点的最终结果。

作者简介:吴婧,女,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:汤晓华(1963—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: tangxiaohua@th.btbu.edu.cn

收稿日期:2019-09-20

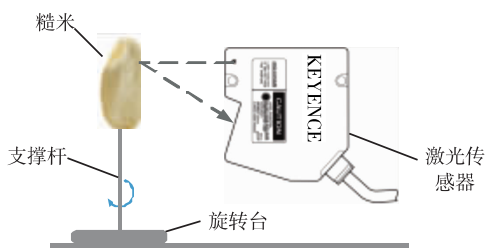


图 1 糙米表面数据检测示意图

Figure 1 Schematic diagram for detecting surface data of brown rice

经过多次扫描获得糙米表面原始点云数 64 080 个, 如图 2 所示, 其中每个测量点的数据波动范围在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。由于糙米表面的表面结构较为复杂, 利用三维扫描技术获得的糙米点云数据存在噪声, 直接进行模型重建会导致重建结果失真, 因此在对糙米进行表面模型重建前, 应先对得到的原始点云数据进行处理。



图 2 糙米表面原始三维点云图

Figure 2 Original 3D point cloud image of brown rice surface

2 糙米表面点云数据处理

2.1 法向量估计

法向量能够直接影响点云曲面模型重建的效果。Hoppe 等^[7]在基于有向距离函数的表面重建算法中, 提出用局部邻域拟合平面的方法来估算法向量, 该方法被称为主元分析法 (principal component analysis, PCA), 能够快速地估计点云的法向量信息。试验利用该方法来进行糙米点云数据的法向量估计。

PCA 是一种常用的数据分析方法, 通过线性变换将原始数据变换为一组各维度线性无关的数据, 可用于提取数据的主要特征分量。PCA 方法是利用局部信息来估计候选点的法向信息, 因此应先对每个候选点进行邻域搜索。文献^[8]中提到的 KD 树近邻搜索算法是目前点云数据近邻搜索常用的算法之一, 通过建立 KD 树并在 KD 树上进行范围搜索即可获得目标点的 k 邻域, 即距离目标点最近的 k 个相邻点云。利用 KD 树近邻搜索算法对候选点 x 进行邻域搜索得到邻域点集 $\{x_{\text{near}}\}$, 将候选点 x 的 k 邻域拟合为一个最小二乘意义上的局部平面, 按式 (1) 计算拟合平面。

$$P(n, d) = \operatorname{argmin}_{(n, d)} \sum_{i=1}^k (n \cdot x_i - d)^2, \quad (1)$$

式中:

$P(n, d)$ —— 拟合平面;

n —— 拟合平面的单位法向量;

x_i —— 候选点 x 各邻域点的空间坐标值, mm;

d —— 候选点 x 到坐标原点的距离, mm。

对上式进行分析, 可知平面 $P(n, d)$ 经过 k 个邻域点的质心, 法向量 n 满足 $\|n\|_2 = 1$, 因此可将上述问题转化为对协方差矩阵的特征值求解, 协方差矩阵的最小特征值对应的特征向量即为所求的法向量 n , 按式 (2) 计算协方差矩阵。

$$M = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T, \quad (2)$$

式中:

M —— 协方差矩阵;

\bar{x} —— 邻域点质心, mm。

由此估计得到的各点法向量方向不一致, 可根据相邻点的向量的点积公式 $n_i \cdot n_j = |n_i| |n_j| \cos\theta$ 进行调整; 当 $n_i \cdot n_j < 0$, 即 $\cos\theta < 0$ 时, n_i 和 n_j 的方向相反, 将 n_j 用 $-n_j$ 代替即可。

2.2 光顺滤波

由于受测量设备、外部环境和被测物体表面特征性等多重因素的影响, 测得的点云数据不可避免地出现噪声, 导致重构的曲线、曲面不光滑, 影响后期三维建模的精度和效率。试验采集得到的点云数据的噪声都是基于以上各种随机误差而造成, 与目标数据点混合在一起, 会影响到三维模型曲面的光顺性, 使得重建的三维模型存在一定程度上的失真, 因此, 为了获得高精度、光顺、逼真的糙米三维模型, 必须对点云数据进行光顺滤波处理。试验研究的点云数据中的噪声大多为小尺度噪声, 鉴于此采用 Savitzky-Golay 滤波方法 (SG 滤波) 进行滤波处理, 该方法能够在保持模型固有几何特征的前提下, 使点云数据变得更加光顺。

SG 滤波器是一种特殊的低通滤波器^[9]。该方法通过在窗口移动运算中引入多项式最小二乘拟合进行滤波处理。其主要原理为: 对点 x_i 的邻域内的 k 个点用 N 阶多项式拟合, 此多项式的系数可借助于最小二乘法准则来确定, 多项式在 x_i 的值就是对应的光滑值 $f_i(x)$ 。

假设有一组以 x_0 为中心的 $2m+1$ 个点数据, 根据实测数据拟合的 N 阶多项式和点的误差按式 (3) 和式 (4) 计算^[10]:

$$f_i(x) = \sum_{k=0}^N a_k \left(\frac{x - x_0}{\Delta x} \right)^k, \quad (3)$$

$$E = \sum_{i=-m}^m [f_i(x) - y_i]^2 = \sum_{i=-m}^m \left[\sum_{k=0}^N a_k \left(\frac{x_i - x_0}{\Delta x} \right)^k - y_i \right]^2, \quad (4)$$

式中:

- $f_i(x)$ —— N 阶多项式;
- a_k —— 多项式系数;
- x_0 —— 中心点横坐标值, mm;
- Δx —— 相邻邻域点横坐标差值, mm;
- E —— 误差平方和;
- x_i —— 邻域点横坐标值, mm;
- y_i —— 邻域点纵坐标值, mm。

假设对于每一个 x_i 都有 $x_{i+1} - x_i \equiv \Delta x$, 当系数 a_k 使得均方误差 E 最小时, 能够获得最优的拟合多项式, 系数矩阵 A 和多项式系数 a 按式(5)和式(6)计算:

$$A = \begin{bmatrix} (-m)^N & (-m)^{N-1} & \cdots & -m & 1 \\ (-m+1)^N & (-m+1)^{N-1} & \cdots & -m+1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ (-m+1)^N & (-m+1)^{N-1} & \cdots & -m+1 & 1 \\ (-m)^N & (-m)^{N-1} & \cdots & -m & 1 \end{bmatrix} \in R^{<2m+1> \times <N+1>} \quad (5)$$

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y. \quad (6)$$

式中:

- A —— a_k 的系数矩阵;
- m —— 单边点数;
- N —— 拟合阶数;
- a —— 多项式系数;
- Y —— 实测数组, 由各领域点纵坐标组成。

由式(3)可得 $f_i(x_0) = a_0$, 因此对于式(6)只需求解出 a_0 值即可。

以糙米胚芽和米身截面数据为例, 利用 Matlab 软件对其进行 SG 滤波处理, 其中有 2 个参数待确定: 多项式拟合的阶数 N 和单边点数 m 。根据式(3)可知, 阶数 N 表示拟合精度, 单边点数 m 表示滤波窗口宽度, 因此当 m 取值相同时, N 值越小, 即滤波窗口宽度一定时, 拟合精度越低, 越多地保留数据中的低频部分, 平滑掉高频部分, 对应的光顺效果越好, 但 N 值过于小时, 会导致滤波结果偏离原始点云数据, 导致误差较大; 当 N 取值相同时, m 的值越大, 即拟合精度相同时, 滤波窗口宽度越大, 邻域点之间的相互影响越大, 对应的光顺效果越好, 但是随着 m 的增大, 点云的细节部分逐渐模糊, 其固有的几何形态也逐渐丢失, 导致过度平滑。

根据图 3(a)、(c) 可看出, 原始点云的截面曲线有许多地方呈锯齿状, 并不光滑。经过 SG 滤波处理后, 在保持糙米截面的几何性质前提下, 滤波后的点云曲线变得光滑, 如图 3(b)、(d) 所示。

一般认为曲线或曲面的曲率变化均匀视为曲线或曲面光滑。图 4 为米身部分截面滤波前后的点云数据的曲

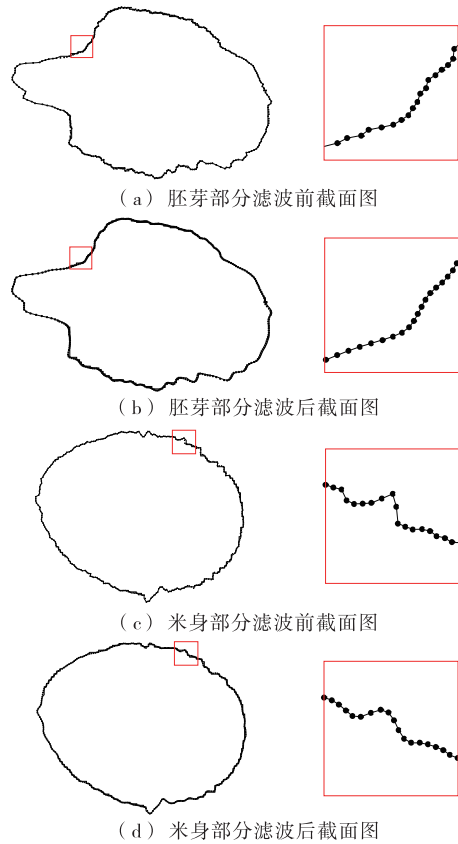


图 3 糙米截面数据滤波前后对比图

Figure 3 Comparison chart of cross-sectional data of brown rice before and after filtering

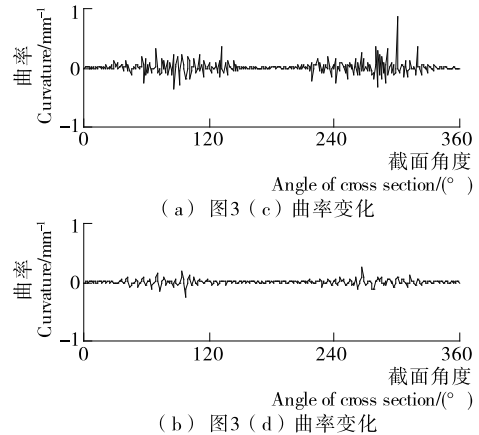


图 4 米身截面数据滤波前后曲率变化图

Figure 4 Curvature change of cross-sectional data of brown rice body before and after filtering

率变化图, 曲率值的具体变化情况见表 1。由表 1 可知, 米身截面点云数据滤波后的曲率极差缩小 43.57%, 曲率均值缩小 29.69%, 曲率方差缩小 18.45%。由此可见, 经滤波后的点云数据的曲率变化更加均匀, 能够达到一定程度的光顺效果。

表 1 米身截面数据滤波前后曲率变化情况分析

Table 1 Analysis of the curvature change of cross-sectional data of brown rice body before and after filtering

数据来源	单位	曲率最小值	曲率最大值	曲率极差	曲率均值	曲率方差
滤波前	mm ⁻¹	-0.340 4	0.877 3	1.217 7	0.006 4	0.010 3
滤波后	mm ⁻¹	-0.262 3	0.268 3	0.530 5	0.001 9	0.001 9
误差	mm ⁻¹	0.078 1	0.609 0	0.687 2	0.004 5	0.008 4
变化率	%	77.06	30.58	43.57	29.69	18.45

经多次试验对比,将多项式拟合的阶数 N 设为 5、单边点数 m 设为 5 时,滤波效果最佳,此时滤波后点云数据与原点云的误差在 3.95% 以内。

3 糙米表面三维网格模型重建

对滤波后的点云数据需要进行网格化处理形成网格曲面。泊松重建算法是一种基于隐式函数的三角网格重建方法,其基本思想是利用泊松方程作为隐式函数,计算测量点云的等值面来构建三维模型表面^[11]。该算法能够在保证局部特征的前提下对全局进行精准的曲面重建。

Kazhdan 等^[12]证明了在有向点集中,未知实体 M 的表面 ∂M 平滑后的指示函数 χ 的拉普拉斯算子等于表面 ∂M 的内法线场 \vec{N} 的散度。由于点云数据是离散的,因此通过离散求和来近似计算曲面积分,泊松求解方程表述为:

$$\Delta \chi = \nabla \cdot \vec{N}$$

$$\Delta (\chi_M \times \tilde{F})(q) = \nabla \cdot \left[\sum_{p \in P} \int_{S_p} \tilde{F}_p(q) \vec{N}(p) dp \right] \approx \nabla \cdot \left[\sum_{p \in P} |S_p| \tilde{F}_p(q) \vec{N}(p) \right], \quad (7)$$

- 式 中:
- χ_M —— M 的指示函数;
- \tilde{F} —— 平滑滤波器;
- \vec{N} —— 点的内法线;
- S_p —— p 点处小面片面积。

根据以上分析,对点云数据进行泊松重建要求点云数据具有法向信息,因此利用 2.1 节中介绍的 PCA 算法来估计糙米表面点云数据的法向量信息。此外,在泊松重建算法中,将函数空间离散化,利用八叉树(Octree)对包含所有点云数据包围盒空间进行细分,从而进行泊松求解。由于八叉树的深度值越大,泊松重建的精度越高,但计算耗时会长,导致效率明显降低。当八叉树深度值 >9 时,计算耗时过长,且其重建效果与深度值为 9 时相差无几,因此选取八叉树深度值为 7,8,9,对 2.2 节中滤波处理后得到的糙米表面点云数据进行泊松重建,重建效果如图 5 所示。结合表 2 可知,当深度值为 7 时,运算时间短,重建网格顶点和面片数少,仅显示出糙米模型的大致轮廓,特征不明显,重建效果粗糙,效果不理想;当深度值为 8 时,运算时间变长,重建网格顶点和面片数增大,模型轮廓逐渐清晰,细节特征逐渐显现,表面较平滑,



图 5 糙米表面点云数据的泊松重建效果

Figure 5 Visualization of Poisson reconstruction of brown rice point cloud data

表 2 泊松重建试验结果

Table 2 Experimental result of Poisson reconstruction

八叉树深度值	重建网格顶点数	重建网格面片数	运算时间/s
7	3 388	6 772	9.109
8	13 660	27 316	21.980
9	25 310	50 406	90.855

重建效果一般;当深度值为 9 时,运算时间更长,重建网格顶点和面片数仍成倍增大,模型轮廓十分清晰,细节特征明显,模型表面光滑,重建效果最佳。

通过对比分析可看出,八叉树深度值越大,模型重建算法运算时间越长,重建的网格顶点数和面片数增大,对应的重建效果越好,局部细节特征也越明显。为同时兼顾重建效果和运算效率,八叉树深度值为 9 时,模型重建效果就能够满足后期分析要求,不需要再增大深度值导致过多增加运算时间。

4 结论

试验以糙米为研究对象,结合非接触式激光扫描测量系统获得糙米表面原始点云并进行处理,得到法向量信息和更加光滑平滑的点云数据,在此基础上,结合泊松重建算法原理,重建出细节特征明显的糙米表面三维模型,能够为后期研究稻米在加工过程中的运动与受力情况提供良好的数据支撑。由于糙米体积小且表面变化复杂,难以获得糙米表面真实模型,如何对重建的糙米表面三维模型进行精度评价值得进一步研究。

参考文献

[1] 刘刚, 司永胜, 冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 38-46, 19.

(下转第 28 页)