

中华人民共和国农业行业标准

NY/T XXXXX—XXXX

作物表型数据三维重建指南

Guidelines for 3D reconstruction of crop phenotypic data

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(送审稿)

(本草案完成时间：2023年11月)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中华人民共和国农业农村部 发布

## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 缩略语 .....	2
5 数据采集 .....	2
5.1 采集设备 .....	2
5.1.1 数字相机 .....	2
5.1.2 三维扫描仪 .....	2
5.2 采集环境 .....	3
5.3 采集方案 .....	3
5.3.1 数字相机采集方案 .....	3
5.3.2 三维扫描仪采集方案 .....	3
5.4 数据预处理 .....	3
5.4.1 数字相机数据预处理 .....	3
5.4.2 三维扫描仪数据预处理 .....	3
6 三维重建方法与技术规范 .....	3
6.1 作物三维重建内容 .....	4
6.2 三维重建技术规范 .....	4
6.2.1 结构光法 .....	4
6.2.2 莫尔法 .....	5
6.2.3 飞行时间法 .....	5
6.2.4 激光扫描法 .....	6
6.2.5 立体视觉法 .....	6
6.2.6 运动恢复结构法 .....	6
7 重建效果评估 .....	7
7.1 评估指标 .....	7
7.1.1 重建精度 .....	7
7.1.2 模型完整性 .....	8
7.1.3 表面平滑度 .....	8
7.2 评估要求 .....	9
参 考 文 献 .....	10

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由农业农村部大数据发展中心提出。

本文件由农业农村部大数据发展中心归口。

本文件起草单位：西北农林科技大学、陕西龙翔四维空间信息科技有限公司

本文件主要起草人：王美丽、乔永亮、岑海燕、姜磊、杜英坤、苏道毕力格、金秀良、杨会君、宋怀波、毛锐、李梅、杨唯、孙丽

本文件是首次制定。

# 作物表型数据三维重建指南

## 1 范围

本文件规定了进行作物表型数据三维重建的技术要求、操作步骤、数据处理和重建效果评估标准的程序。

本文件适用于作物遗传学研究、作物育种技术和植物表型分析等领域的研究人员和技术人员。本文件亦适用于农业教育和相关农业技术推广活动，以指导和标准化作物表型数据的三维重建工作。不适用于作物品质、成分等化学指标信息的测定预评估。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2822-2005 文件尺寸

GB/T 8170-2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 18784 CAD/CAM 数据质量

GB/T 24734.1-2009 技术产品文件 数字化产品定义数据通则 第1部分：术语和定义

GB/T 26099.1-2010 机械产品三维建模通用规则 第1部分：通用要求

DB6111T 175-2021 智慧农业 果实三维数字化数据采集及建模技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 结构光法 Structured Light Technique

使用特定模式的光线（如条纹或格子）照射在目标物体上，并通过检测光线模式如何变形来获取物体的三维形状信息的过程。

### 3.2

#### 莫尔法 Moiré Technique

通过两个相似的格子或图案的重叠，产生干涉模式，进而推导出物体的三维形状信息的过程。

### 3.3

#### 飞行时间法 Time-of-Flight (ToF) Technique

通过测量光或电磁波从发送器到目标物体再返回到接收器所需的时间来获取物体的距离信息的过程。

### 3.4

#### 激光扫描法 Laser Scanning Technique

使用激光束扫描目标物体，并测量反射回来的激光信号，从而获取物体的三维形状信息的过程。

## 3.5

## 立体视觉法 Stereoscopic Vision Technique

通过从不同的角度捕获目标物体的图像，并使用视差原理推导出物体的三维形状信息的过程。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件：

——CAD——计算机辅助设计(Computer Aided Design)；

——SFM——运动恢复结构(Structure From Motion)。

## 5 数据采集

## 5.1 采集设备

## 5.1.1 数字相机

选用彩色相机、摄像头或手机等普通RGB摄像设备。调试确定设备的分辨率、拍摄距离等具体参数，参见表1。

表1 数字相机参数要求

项目	具体要求
设备选型	数字相机
分辨率	最低支持1024*768
距离范围	地面采集：≥20cm 空中采集：≥100cm
拍摄数量	每一方位≥2张

摄像头内部参数由摄像头本身元件所确定。计算方法见公式(1)。

$$\text{focal}_{pix} = \frac{\max(w_{pix}, h_{pix}) \times \text{focal}_{mm}}{ccdw_{mm}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$\text{focal}_{pix}$  ----焦距（像素）；

$\text{focal}_{mm}$  ----焦距（毫米）；

$w_{pix}$  ----图像宽度（像素）；

$h_{pix}$  ----图像高度（像素）；

$ccdw_{mm}$  ----传感器尺寸（毫米）。

参数通常包含于图像EXIF信息中，若缺失，也可以通过计算相机元件参数获得。

## 5.1.2 三维扫描仪

三维扫描仪结合了多种技术，如结构光和激光，以获得目标的全面三维信息。选择与应用相匹配的三维扫描仪并确保其性能满足需求。参见表3。

表2 三维扫描仪参数要求

项目	具体要求
设备选型	三维扫描仪
精度	$\geq \pm 0.05 \text{ mm}$
扫描范围	$\geq 10 \text{ cm}$
数据输出	.ply, .stl, .obj等格式

## 5.2 采集环境

光照条件：尽量在稳定、均匀的光照条件下进行采集，避免产生过多阴影或反光。

背景与底座：使用中色色（如灰色）的背景和底座，避免背景与作物颜色过于接近。

稳定性：采集过程中采集设备和目标物体保持稳定，无明显抖动。

## 5.3 采集方案

### 5.3.1 数字相机采集方案

针对数字相机，采集方案应确保从多个角度和距离对目标进行拍摄，以获得全面的数据。为此，可以考虑使用三脚架或其他固定设备，并确保每个角度至少拍摄2张照片。

### 5.3.2 三维扫描仪采集方案

根据目标物体的形状和大小，规划合适的扫描路径。为确保数据的完整性，从不同的角度进行扫描，确保覆盖目标物体的所有表面。

## 5.4 数据预处理

### 5.4.1 数字相机数据预处理

对于数字相机获得的数据，首先进行亮度、对比度和色彩平衡的调整。然后，使用图像处理软件分割目标和背景，并进行必要的去噪和锐化操作。

### 5.4.2 三维扫描仪数据预处理

使用专业的三维处理软件，如MeshLab或CloudCompare，将多个数据集融合为一个连贯的三维模型。此外，对模型进行必要的优化，如平滑处理、填充孔洞和去除异常部分。

## 6 三维重建方法与技术规范

作物重建对象、三维重建方法及规范如图1所示：



图 1 作物重建对象、三维重建方法及规范

## 6.1 作物三维重建内容

作物三维重建内容主要包括以下部分：

- 根系结构：对作物的根系进行三维重建，以揭示其在土壤中的分布、形态和连接方式；
- 茎干与分枝：重建主茎和各级分枝，呈现作物的支撑结构和分枝模式；
- 叶片结构：详细展现叶的形状、大小、排列和角度；
- 果实与种子：对于结果作物，重建果实的外部形态和内部结构，如籽粒、果肉等；
- 花与花器官：包括花瓣、雄蕊、雌蕊等部分的三维展示；
- 病害与虫害特征：对于受到病害和虫害影响的部分，展现其病斑、虫害痕迹和蛀洞等特征；
- 与其他作物的关系：在种植密度较大或作物间种植的情况下，展现作物间的空间关系和交互。

## 6.2 三维重建技术规范

### 6.2.1 结构光法

#### 6.2.1.1 光源与模式选择

稳定性：确保光源能稳定地发出所需的光模式。

模式设计：光线模式应具有良好的空间频率和对比度，以便在物体表面产生清晰的模式。

#### 6.2.1.2 相机选择与配置

分辨率：相机应有足够的分辨率以捕获细节。

灵敏度：相机应能捕获微弱的反射光。

#### 6.2.1.3 系统几何校准

确保相机和投影仪之间的几何关系已校准。

估计内部和外部参数，如焦距、主点、旋转和平移。

#### 6.2.1.4 数据解析与三维重建

确保正确解析捕获的反射模式，以从中提取三维信息。  
使用合适的算法根据解析的数据恢复三维形状。

#### 6.2.1.5 系统同步

确保在进行扫描时，光源投射和相机捕获是同步的。

### 6.2.2 莫尔法

#### 6.2.2.1 模式选择与设计

稳定性：所使用的模式应具有稳定、清晰的特性，以确保产生明显的莫尔条纹。  
对比度与频率：模式应具有高对比度和适当的空间频率，以优化莫尔条纹的可见性。

#### 6.2.2.2 光源选择

均匀性：确保光源能均匀地照亮整个物体表面，避免光源引起的干扰。  
强度：光源的强度应适中，以避免过曝或欠曝。

#### 6.2.2.3 相机选择与配置

分辨率：相机应具有足够的分辨率，以捕获莫尔条纹的细节。  
灵敏度：相机应具有高灵敏度，以确保在低光照条件下也能捕获清晰的莫尔条纹。

#### 6.2.2.4 数据处理与解析

条纹检测：应使用高效的算法准确检测莫尔条纹。  
深度恢复：基于莫尔条纹的形态和特性恢复物体表面的三维信息。

### 6.2.3 飞行时间法

#### 6.2.3.1 光源选择

类型：通常使用脉冲激光作为光源。  
稳定性：光源应能稳定地发射短脉冲的光线。  
波长：选择对目标物体反射性能良好的光线波长。

#### 6.2.3.2 传感器选择与配置

灵敏度：传感器应能准确地检测微弱的反射光。  
分辨率：具有足够的分辨率以捕获详细的深度信息。  
速度：传感器的响应时间应足够快，能够准确测量光的飞行时间。

#### 6.2.3.3 环境条件

外部光干扰：确保没有其他光源对测量产生干扰。  
物体表面特性：对于高反射或透明的物体，可能需要额外的处理或设置。

#### 6.2.3.4 数据处理与校正

校正方法：对原始深度数据进行温度、环境光和多路径效应的校正。  
噪声滤波：去除由于电子噪声或其他干扰因素引起的噪声。



## 6.2.4 激光扫描法

### 6.2.4.1 激光源选择

稳定性：激光源应发出稳定、连续的激光束。  
波长：根据目标物体的材质和颜色选择合适的激光波长。  
功率：确保激光的功率足够但不会对物体或人造成伤害。

### 6.2.4.2 扫描机制

速度：扫描速度应与数据采集和处理速度相匹配。  
分辨率：扫描的分辨率应足够高，以捕获细节。  
范围：扫描的范围应根据目标物体的大小和形状进行调整。

### 6.2.4.3 传感器选择与配置

灵敏度：传感器应对微弱的反射激光有足够的灵敏度。  
分辨率：传感器的分辨率应与激光扫描的分辨率相匹配。

### 6.2.4.4 数据处理与校正

校正：对系统引入的偏差和误差进行校正。  
滤波：从数据中去除噪声和异常点。

## 6.2.5 立体视觉法

### 6.2.5.1 相机选择与配置

分辨率：相机应具有足够的分辨率，以捕获细节。  
内部参数：如焦距、畸变系数等应已知或可估计。  
同步：对于多相机系统，所有相机应同步操作，以确保同时捕获。

### 6.2.5.2 基线距离

距离：两个相机之间的距离（基线）应适当，以确保有足够的视差但不会导致匹配困难。  
方向：相机的方向应根据目标物体和所需的三维精度进行调整。

### 6.2.5.3 特征提取与匹配

稳定性：在图像中提取的特征应具有高度的稳定性。  
匹配准确性：应使用鲁棒的方法来匹配不同视图中的特征。

### 6.2.5.4 三维重建技术

算法选择：应选择适当的三维重建算法，如立体匹配、捆绑调整等。  
优化：应使用优化方法来提高三维重建的精度。

## 6.2.6 运动恢复结构法

### 6.2.6.1 图像质量

清晰度：图像应该清晰，无模糊，以确保特征点的准确提取。  
分辨率：高分辨率图像通常提供更多的细节，但同时也增加了计算的复杂性。

覆盖范围：保证每个场景或物体都被多个图像从不同的视角拍摄。

#### 6.2.6.2 特征提取与匹配

稳定性：选取的特征点应在多个图像中稳定可靠。

匹配准确性：确保特征点之间的匹配是正确的，以减少误差。

#### 6.2.6.3 相机内外参数

内参数：如焦距、畸变系数等应已知或可估计。

外参数：相机的位置和方向在SFM中将被估计。

#### 6.2.6.4 优化技术

捆绑调整：对所有相机的内外参数和三维点进行联合优化，以最小化投影误差。

鲁棒性：对误匹配和噪声数据具有鲁棒性。

#### 6.2.6.5 稠密重建

深度估计：对每个像素或区域估计其深度。

三维模型生成：基于深度信息生成稠密的三维模型。

### 7 重建效果评估

#### 7.1 评估指标

##### 7.1.1 重建精度

重建精度反映了重建模型与真实物体在空间上的几何差异。

##### 7.1.1.1 点到点距离

对于模型和真实物体上的对应点，计算它们之间的欧氏距离。再对所有点的距离取平均，得到平均误差。计算方法见公式（2）。

$$d_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| P_{\text{model},i} - P_{\text{real},i} \| \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$d_{AE}$  ----平均误差；

$P_{\text{model},i}$  ----重建模型上的点；

$P_{\text{real},i}$  ----真实物体上的对应点；

$n$  ----点的数量。

##### 7.1.1.2 最大距离

找出所有点到点距离中的最大距离，将其作为最差的重建误差。计算方法见公式（3）。

$$d_{ME} = \max_i \| P_{\text{model},i} - P_{\text{real},i} \| \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$d_{ME}$  ----最大误差;

$P_{\text{model},i}$  ----重建模型上的点;

$P_{\text{real},i}$  ----真实物体上的对应点。

### 7.1.1.3 Hausdorff 距离

Hausdorff距离是衡量两个点集之间相似性的一种方法。它被定义为两个点集之间点到点距离的最大值。计算方法见公式(4)。

$$d_H(A, B) = \max \left( \max_{a \in A} \min_{b \in B} d(a, b), \max_{b \in B} \min_{a \in A} d(a, b) \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$d_H(A, B)$  ----点集A和B之间的Hausdorff距离;

$d(a, b)$  ----点  $a$  和点  $b$  之间的距离。

### 7.1.2 模型完整性

模型完整性关注重建模型是否完整地表达了真实物体的所有信息。计算真实物体上存在但在重建模型中遗漏的部分所占的百分比。较低的百分比表示更好的模型完整性。计算方法见公式(5)。

$$M_p = \frac{V_{\text{real}} - V_{\text{model}}}{V_{\text{real}}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$M_p$  ----重建模型中遗漏的部分所占的百分比;

$V_{\text{real}}$  ----真实物体的体积;

$V_{\text{model}}$  ----重建模型的体积。

### 7.1.3 表面平滑度

表面平滑度指重建模型的表面是否平滑,有无多余的噪声或扭曲。通过平均表面从其平均平面的垂直偏差计算表面粗糙度。计算方法见公式(6)。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$R_a$  ----平均粗糙度;

$L$  ----评估长度；

$y(x)$  ----表面轮廓。

## 7.2 评估要求

作物表型数据三维重建模型评估应遵循以下原则：

作物三维模型的数据质量满足GB/T 18784的要求；

作物三维模型应具备实用性，可根据作物三维模型，判断作物生长状况、病虫害情况，得到作物详细的形态、生理和生化表型信息等；

作物三维模型与真实作物的实际误差不得超过5%；

作物数字化三维模型应具有对真实作物细节的表达能力，如器官结构、果实表面特征等，满足真实作物形态特征和生物量计算的精度需求。

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 2822-2005 文件尺寸
  - [2] GB/T 8170-2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定
  - [3] GB/T 18784 CAD/CAM 数据质量
  - [4] GB/T 24734.1-2009 技术产品文件 数字化产品定义数据通则 第1部分：术语和定义
  - [5] GB/T 26099.1-2010 机械产品三维建模通用规则 第1部分：通用要求
  - [6] DB6111T 175-2021 智慧农业 果实三维数字化数据采集及建模技术规范
-