

基于激光雷达的作物收获导航线实时提取方法研究

周海燕^{1,2} 杨悦^{1,2} 刘阳春^{1,2} 马若飞^{1,2} 张峰硕³ 张启帆⁴

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;
3. 吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118; 4. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 为提高联合收获机无人驾驶导航路径的精度, 本文提出一种基于激光雷达的作物收获导航线实时提取方法。搭建点云数据采集系统, 利用平面拟合法确定激光雷达安装高度和安装角度。利用三维激光雷达扫描收获机前方作物的点云数据, 结合 IMU 惯性传感器反馈的姿态信息, 实现作物点云数据从激光雷达坐标系到车体坐标系的变换。基于激光雷达扫描视场角、安装高度和安装角度获取感兴趣区域(ROI)的坐标, 并对感兴趣区域进行直通滤波和统计滤波, 去除灰尘、秸秆粉末等噪声的影响, 以实现点云数据无效点和离群点的剔除。提出一种基于栅格八邻域高程差的作物收获导航线快速识别算法, 以点云栅格化后在 Z 轴方向上的坐标值作为检测依据, 定义某一栅格与其 8 个相邻栅格在 Z 轴坐标上的差值为高程差, 遍历栅格并根据设定阈值进行比较判断, 实现收获边界点的有效提取。采用最小二乘算法进行收获边界点的拟合, 实现田间作业过程中作物收获导航线动态提取。田间试验表明, 该方法具有较好的鲁棒性, 能在作物稀缺、杂草较多等情况下保持较高的准确性, 其中前进方向偏差角平均值为 0.872°, 割台横向偏差为 0.104 m, 收获导航线准确率为 93.5%, 可为联合收获机工作提供辅助导航, 提高无人驾驶的准确率。

关键词: 联合收获机; 激光雷达; 点云栅格; 八邻域; 导航线

中图分类号: S24; TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0009-09

Real-time Extraction of Navigation Line Based on LiDAR

ZHOU Haiyan^{1,2} YANG Yue^{1,2} LIU Yangchun^{1,2} MA Ruofei^{1,2} ZHANG Fengshuo³ ZHANG Qifan⁴

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China
3. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China
4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: In order to improve the precision of unmanned navigation path of combine harvester, a real-time extraction method of crop harvesting navigation line was proposed based on LiDAR. A point cloud data acquisition system was built, and the installation height and angle of LiDAR were obtained by plane fitting method. The transformation of point cloud data from LiDAR coordinate system to vehicle coordinate system was realized by using three-dimensional LiDAR to scan the crop point cloud data in front of the harvester and combining the attitude information fed back by IMU inertial sensor. The coordinates of the ROI were obtained based on the scanning field angle, installation height and installation angle of LiDAR, and the ROI was filtered through and statistically to remove impurities such as dust and straw powder, so as to eliminate invalid points and outliers in point cloud data. A fast recognition algorithm of navigation line based on the elevation difference of eight neighboring grids was proposed. The coordinate value in the Z-axis direction after the point cloud rasterized was taken as the detection basis, and the difference between grid and its eight neighboring grids in the Z-axis coordinate was defined as the elevation difference. The grid was traversed and compared according to the set threshold, so as to effectively extract the harvesting boundary points. The least square algorithm was used to fit the harvesting boundary points, and the harvesting navigation line was obtained. Experiments showed that the algorithm had good robustness, and can maintain high accuracy when crops were scarce and there were many weeds, among

which the average error angle of forward direction was 0.872° , the lateral deviation of header was 0.104 m, and the correct rate of harvesting navigation line was 93.5%, which can provide auxiliary navigation for combine harvester and improve the accuracy of unmanned driving.

Key words: combine harvester; LiDAR; point cloud grid; eight neighborhoods; navigation line

0 引言

农机无人驾驶技术能够提高作业精度和效率、缓解劳动力紧缺、促进农业生产力发展^[1],有关联合收获机无人驾驶技术是我国农业发展的热点,也是重要方向之一。稻麦收获作业过程中,谷物收获边界线是无人驾驶收获的重要数据来源^[2],可以为联合收获机作业路径提供规划方向,提供辅助导航^[3]。收获导航线的提取可以提高作业精度,实现精准、高效收获。

目前,国内外有关作物收获导航线提取的方法主要有机器视觉法^[4-6]和激光测距法^[7-10]。基于机器视觉的方法多为联合收获机搭载相机拍摄稻麦收获过程中前方作物图像,分析图像获取收获导航线。曾宏伟等^[11]利用摄像头采集小麦图像,提出一种区域生长算法,获取已收获区域和未收获区域分界线。LUO等^[12]利用深度相机获取水稻和油菜图像,利用已收获区域和未收获区域高度差,通过最大类间方差法分割提取边界线。魏新华等^[13]利用双目视觉,提出一种改进的密度峰聚类 and K 均值聚类的方法,融合彩色信息和高度信息,提取收获边界点。以上基于机器视觉的方法中,采集的图像数据易受天气的影响,导致算法的精度和稳定性较差,在谷物成熟度不同、背景多样化条件下,不具有普遍适用性。而激光雷达相较于机器视觉,它不受光线、杂草遮挡等因素的影响,具有良好的稳定性。基于激光测距的方法是联合收获机搭载激光雷达,获取前方稻麦收获区域的信息,并进行分析获取收获导航线。ZHAO等^[14]利用激光雷达获取麦田信息,采用 Otsu 方法检测各扫描轮廓上的作物边缘位置并利用最小二乘法进行拟合。伟利国等^[15]采用二维激光雷达对小麦的边界线进行在线识别,通过对阶跃信号特征变化的识别确定收获边界信号点。尚业华等^[16]利用二维激光雷达获取稻麦信息,对比了 K-means 聚类和 Z 向中心差分法检测稻麦收获边界的精度并进行了误差分析。以上基于激光雷达的方法相较于机器视觉具有更强的抗干扰性,适用于多种收获环境。三维激光雷达能够准确地形成作物的三维信息,适用于无人驾驶在多场景下实时提取收获导航线的要求。

基于激光雷达获取农作物导航线相关研究中,

较为常用的方法是微分法和阈值法。微分法易受噪声影响,且对待收获区域平整性要求较高,算法稳定性较差;阈值法原理简单,作物高度差明显,应用较为广泛。为了提高作物收获导航线的提取精度,及时为无人驾驶收获机提供辅助导航数据,本文提出一种基于三维激光雷达获取的作物信息和基于栅格八邻域高程差的作物收获导航线快速识别方法,实现作物收获过程中导航线的实时提取。

1 采集点云数据

点云数据采集系统由联合收获机、车载终端、三维激光雷达、惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)组成,如图1所示。激光雷达和 IMU 安装在驾驶室顶端,安装角度为 43.8° ,安装高度为 3.15 m,安装位置距收获机驾驶室左侧 0.95 m。



图1 点云数据采集系统示意图

Fig.1 Schematic of point cloud data acquisition system

1. 激光雷达 2. IMU 3. 雷达安装支架 4. 车载终端 5. 联合收获机 6. 割台

1.1 搭载平台

点云数据采集系统可安装于不同型号的联合收获机,根据联合收获机高度、驾驶室宽度和待收获作物高度等参数可确定激光雷达的最佳安装角度。本研究使用的搭载平台是雷沃谷神 GM80 型谷物联合收获机。该联合收获机高度为 2.98 m,驾驶室宽度为 2.12 m,工作幅宽为 2.75 m,纵轴流滚筒采用液压无级变速调节,适合小麦、水稻、玉米等多种作物的收获。

1.2 点云数据采集装置

点云数据采集传感器选用美国 Velodyne 公司生产的 VLP-16 型三维激光雷达,具体参数如表1所示。VLP-16 型激光雷达质量为 830 g,体积较小,适于安装在无人驾驶车辆上,每秒约 3.2×10^5 点云输出,通过以太网通信,可实时反馈测量物体的

三维坐标、反射率、旋转角、同步时间等信息。

表 1 VLP-16 型激光雷达传感器主要参数
Tab.1 Sensor parameters of VLP-16 LiDAR

参数	数值
激光波段中心波长/nm	905
激光通道数	16
工作电压/V	9~32
测量距离/m	100
测量精度/cm	±3
数据获取速度/(点·s ⁻¹)	3.2×10 ⁵
垂直视场角/(°)	±15
水平视场角/(°)	360
垂直水平角分辨率/(°)	2
水平角分辨率/(°)	0.1~0.4
旋转速率/Hz	5~20

惯性测量单元选用 HWT901B,用于实时反馈收获机相对于地面的姿态角。车载终端使用 Inter 5 处理器,软件采用 Visual Studio 2015 软件开发工具,C++和 PCL 混合编程。

2 作物边界识别和导航线拟合

2.1 激光雷达标定

IMU 固定在激光雷达上表面,激光雷达和 IMU 共同固定在安装支架上,激光雷达和 IMU 安装角度可调节,如图 2a 所示。激光雷达安装在收获机上,安装角度为 γ ,距地安装高度为 h ,激光雷达垂直视场角为 δ ,激光雷达扫描前方作物如图 2b 所示。点云数据采集装置,共存在 3 个坐标系,分别是激光雷达坐标系、IMU 坐标系和车体坐标系,激光雷达原点和车身坐标系原点之间的距离为 h ,如图 2c 所示。

作业前先对激光雷达进行标定,确定安装角度,

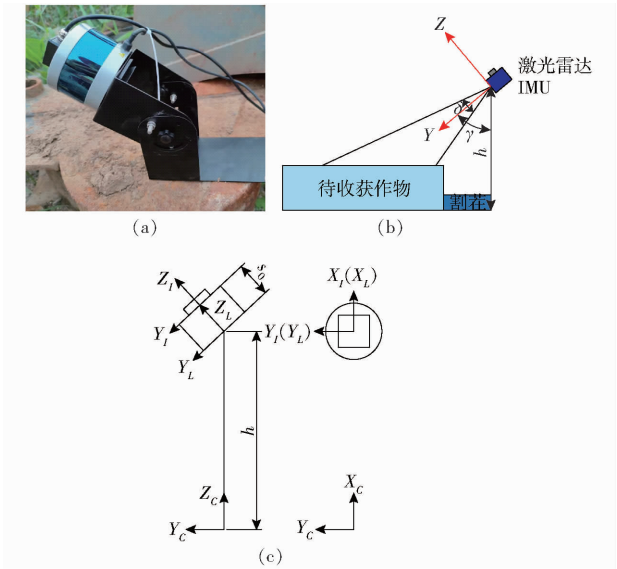


图 2 激光雷达和 IMU 安装位置示意图
Fig.2 Installation position of LiDAR and IMU

采用平面拟合求解激光雷达位姿法^[17]。

激光雷达安装固定后,选取一处平坦宽敞的地面作为待扫描区域,利用激光雷达扫描该区域获取点云数据。使用随机抽样一致性^[18] (Random sample consensus,RANSAC)算法进行平面提取,得到拟合平面方程

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{1}$$

由此获得拟合平面的 4 个参数 A 、 B 、 C 和 D 。

激光雷达安装完成后,拟合平面如图 3a 所示,采用最小二乘法拟合平面得到平面的拟合系数,如图 3b 所示。根据公式计算得到激光雷达安装初始俯仰角为 -43.82° ,激光雷达安装初始横滚角为 0.14° ,安装高度 h 为 3.15 m 。



图 3 拟合平面示意图
Fig.3 Fitting plane schematics

2.2 变换点云坐标

联合收获机工作过程中,激光雷达实时获取前方点云信息,所获取的作物点云是在激光雷达坐标系下,为了方便后续点云处理,需要将作物点云从雷达坐标系转换到车体坐标系下。

收获机收获作物过程中,农田地形颠簸收获机存在俯仰、横滚的微小角度变化,这个微小变化会给作物高度测量带来误差^[19]。IMU 能够高频反馈动态欧拉角,可以获得激光雷达和车体坐标系之间的实时坐标变换矩阵,从而提高获取点云信息坐标的精度。

将激光雷达坐标系下的点云信息转换到车体坐标系下,坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ \sin\theta\sin\psi & \cos\theta & -\sin\theta\cos\psi \\ -\sin\psi\cos\theta & \sin\theta & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 x_L 、 y_L 、 z_L ——激光雷达坐标系下作物点云坐标

x_c 、 y_c 、 z_c ——车身坐标系下作物点云坐标

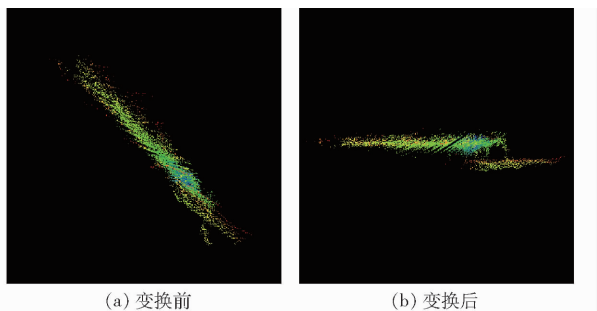
θ ——激光雷达俯仰角

ψ ——激光雷达横滚角

激光雷达扫描得到的点云数据和坐标变换后的点云数据如图 4 所示。

2.3 ROI 区域确定

由于激光雷达的视场角幅宽较大,极易照射到其他非作物的物体上,导致数据处理难度加大,不确



(a) 变换前 (b) 变换后

图4 坐标变换前后作物点云

Fig. 4 Crop point cloud before and after coordinate transformation

定因素增加,且整幅点云数据处理量较大,激光雷达处理耗时高,因此需要对整幅点云进行裁剪^[20]。

联合收获机作业过程中激光雷达扫描前方作物示意图如图5所示。激光雷达扫描的垂直视场角 θ 为 30° ,水平视场角为 360° ,激光雷达安装角度 γ 为 43.82° ,安装距地高度 h 为 3.15 m ,收获前,统计前方待收获区域作物高度均值 e 为 0.78 m 。雷达扫描的待收获区域如图5中红色框图所示,待收获区域宽度 l_{AB} 计算式为

$$l_{AB} = (h - e) \tan\left(\gamma + \frac{\theta}{2}\right) - (h - e) \tan\left(\gamma - \frac{\theta}{2}\right) \quad (3)$$



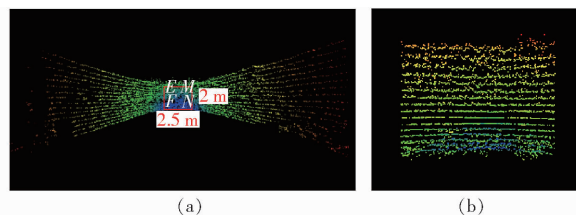
图5 雷达扫描待收获作物示意图

Fig. 5 Schematic of radar scanning crops to be harvested

根据式(3)计算得到点 A 在 Y 轴方向上坐标值为 3.92 m ,点 B 在 Y 轴方向上坐标值为 1.30 m ,得到待收获区域宽度 l_{AB} 为 2.62 m 。

选取收获机割台前方作物待收获区域作为ROI的备选区域。选取最具有代表性且干扰性最少的区域作为感兴趣区域,形状设置为矩形,该矩形长度 W 为 2.5 m ,高度 L 为 2 m ,该区域符合要求,如图6所示。图6a为激光雷达扫描的待收获区域作物示意图,图中矩形方框为裁剪的ROI区域,该矩形4点坐标分别为: $E(-1.25\text{ m}, 3.5\text{ m})$ 、 $F(-1.25\text{ m}, 1.5\text{ m})$ 、 $M(1.25\text{ m}, 3.5\text{ m})$ 、 $N(1.25\text{ m}, 1.52\text{ m})$ 。图6b为裁剪后感兴趣区域作物示意图。后续基于裁剪后的ROI进行点云的数据处理,可以大大减少点云数量

和工作量。



(a) (b)

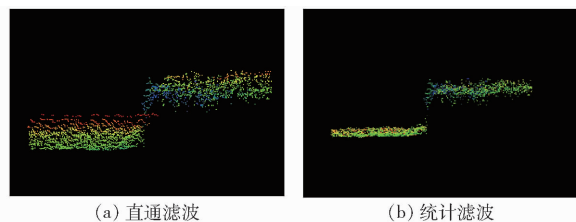
图6 裁剪前后 ROI 区域

Fig. 6 ROI area before and after cropping

2.4 点云滤波和去噪

在收获作业过程中,激光雷达扫描范围内所有物体信息,包括被测作物、地面、周围环境等,以及空气中的浮尘^[21]粉尘碎屑等。ROI区域裁剪能够剔除大量不属于待收获作物的点云数据,只保留联合收获机前方小部分作物的点云信息。但是由于作业过程中还会产生大量的灰尘、秸秆粉末等噪声,会使点云数据存在一定的无效点和离群点,因此需要对点云数据进行滤波处理。无效点是指远离点云主体的散乱点云与点云簇,离群点是指成片或孤立的距离点云主体较近的点云簇^[22]。

直通滤波主要用于去除ROI区域内的无效点,其主要方法是过滤掉指定维度上取值不在给定值域内的点。直通滤波的优点是简单高效,多适用于背景消除。成熟小麦平均高度约为 78 mm ,设定其在 Z 轴方向上滤波取值范围为 $0 \sim 85\text{ mm}$ 。通过直通滤波,去除不在给定范围内的无效点,对点云进行初步处理,如图7a所示。



(a) 直通滤波

(b) 统计滤波

图7 点云滤波

Fig. 7 Point cloud filtering

收获过程中的灰尘等杂质还会产生离群点,针对离群点,采用统计滤波的方式。统计滤波是对每一个点的邻域进行统计分析,计算到所有临近点的平均距离,得到一个高斯分布,其形状主要由均值和标准差决定,不在该范围内的点,可以被定义为离群点进行剔除^[23]。

假设点云中所有点的距离构成高斯分布,其形状由均值 μ 和标准差 σ 决定。设点云中的第 N 个点的三维坐标为 $P_n(x_n, y_n, z_n)$,则该点到任意一点的 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 的距离 d_i 可以表示为

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2} \quad (4)$$

遍历每个点到任意点之间距离平均值计算式为

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (5)$$

标准差计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \mu)^2} \quad (6)$$

统计滤波后点云图像如图 7b 所示,统计滤波流程图如图 8 所示。

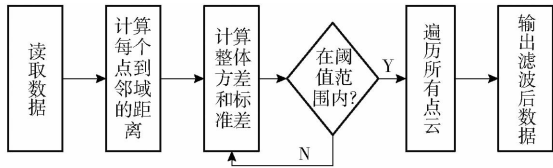


图 8 统计滤波流程图
Fig. 8 Statistical filtering flow chart

2.5 点云边界点提取算法

已收获作物和未收获作物之间存在较为明显的高度差,图 9 为某一条激光线下作物收获示意图。

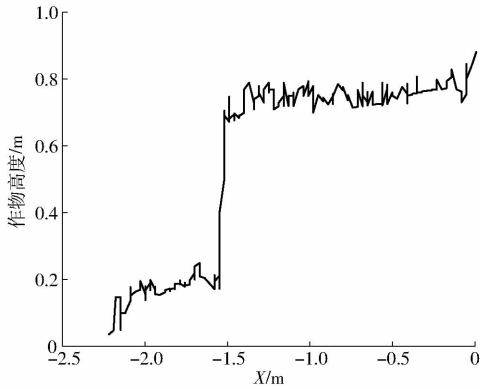


图 9 作物高度对比
Fig. 9 Crop height comparison chart

根据高度差可以进行点云的边界提取,主要方法有阈值法和微分法,其中,阈值法应用较为广泛。阈值法主要分为纯高度阈值法和最佳分割阈值法。纯高度阈值法是在坐标变换后的 X 方向遍历所有激光扫描点,判断第一个符合设定阈值的对象为候选边界点。该算法优点是原理简单,计算量小,缺点是易受噪声影响,将噪声点误检测为边界点而造成误差。最佳分割阈值法是利用最大类间方差自动确定阈值,根据阈值划分已收获区域和未收获区域。该算法优点是原理简单、静止状态下精度较高;缺点是对噪声较为敏感,阈值的选取受其影响较大,波峰不明显时导致分割效果较差。

综上,在阈值法的基础上,提出一种基于栅格八邻域高程差 (GEH)^[24] 的作物收获边界点提取算法。该算法主要原理为:点云栅格化后对比栅格与周围 8 个栅格高度之间差距判断边界点。

该算法的主要步骤是:对点云在 Z 轴方向上进行投影,将点云数据栅格化,计算每个栅格内点云数

据在 Z 轴方向上的高度,该栅格与其周围邻域 8 个栅格在 Z 轴上坐标差值,定义为栅格高程差 Δ ,由此判断栅格内是否存在边界点,对存在边界点的栅格进行提取,其流程如图 10 所示。

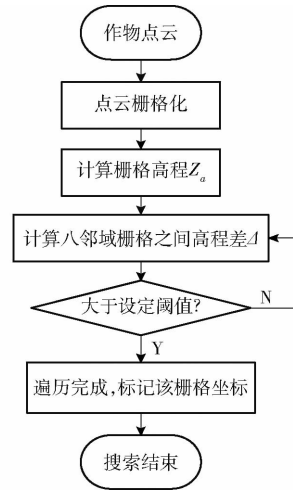


图 10 算法流程图
Fig. 10 Algorithm flow chart

将坐标变换、滤波后的点云在 Z 轴上的高程投影到 XOY 平面上,对投影点云进行栅格划分,点云栅格化的过程如下:

- (1) 确定待处理区域在 XOY 平面的坐标边界值 $(x_{\min}, x_{\max})$ 和 $(y_{\min}, y_{\max})$ 。
- (2) 设置网格边长 s , 根据 s 计算网格行数 r 和列数 c , 计算式为

$$\begin{cases} r = \left\lceil \frac{y_{\max} - y_{\min}}{s} \right\rceil \\ c = \left\lceil \frac{x_{\max} - x_{\min}}{s} \right\rceil \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整函数。

- (3) 根据行列值计算划分的栅格号若其位于第 n 列和第 m 行, 则其栅格号可以表示为 (n, m) 。

基于栅格八邻域高程差算法中,栅格中心的点定义为点 p ,其周围 8 个栅格分别定义为点 1 ~ 点 9, 如图 11 所示。

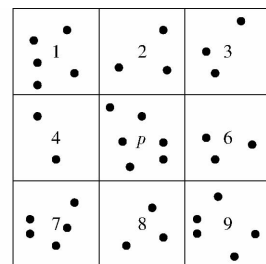


图 11 3×3 栅格划分示意图

Fig. 11 3×3 schematic of grid division

根据计算得到每个栅格内所有投影点的加权平均值 Z_g , 作为该栅格高程, 若该栅格内不存在投影

点,则记为空值,栅格高程计算式为

$$Z_a = \frac{\sum_{k=1}^N L_K}{N} \tag{8}$$

式中 L_K ——栅格内投影点高程
 N ——栅格内点个数

作物点云栅格化图像如图 12 所示,其中图 12a 为点云栅格化后图像在 XOY 平面上的投影,图 12b 为点云栅格化的三维图。

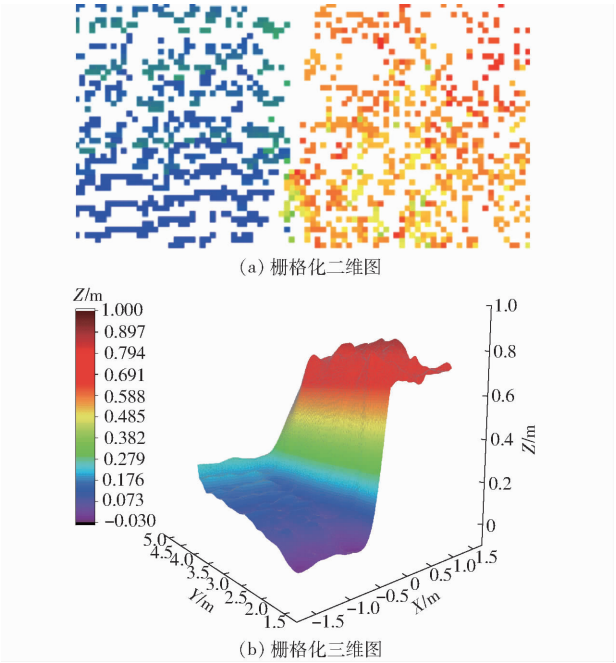


图 12 作物点云栅格化图像

Fig. 12 Rasterized images of crop point cloud

对于任意栅格,将其高程与周围 8 个邻域栅格的高程进行比较,并设定阈值为 H_{th} ,当 8 个邻域栅格中高程差 Δ 大于设定阈值 H_{th} 时,则认为该栅格内存在边界点,并记录该栅格点的坐标。为了便于计算, Y 轴方向每 0.1 m 取一个栅格点作为边界点,既保证了作业精度,又提高了作业速度,边界点示意图如图 13 所示。

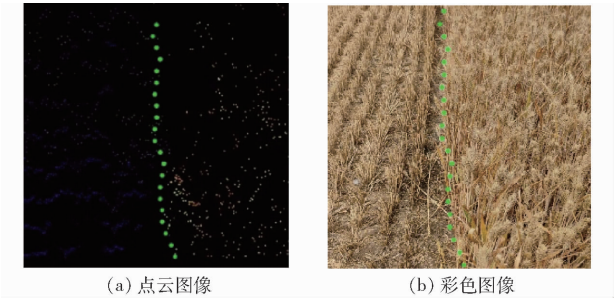


图 13 边界点示意图

Fig. 13 Schematics of boundary point

小麦实际生长过程中,可能会由于漏播、倒伏等现象存在高度上的差距,从而导致识别出错误的边

界点,为了解决这一问题,可以对边界点进行筛选,由于收获边界点近乎位于一条平行于前进方向 Z 轴的直线上,可根据点云的方位角信息,剔除明显不属于收获边界线上的点。

2.6 导航线拟合

利用最小二乘法拟合边界点,得到作物导航线。最小二乘法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,该算法的优点是方法简单、实现容易且最优解唯一^[25],适用于小麦收获场景中有关边界点的拟合,由于边界点线性相关度较高,所以拟合效果较好。最小二乘法拟合公式为

$$y = kx + b \tag{9}$$

根据边界点进行最小二乘拟合,得到拟合的结果如图 14a 所示,小麦收获导航线最小二乘直线的公式为

$$y = -16.2676x + 21.2739 \tag{10}$$

图 14b 为小麦收获导航线实际拟合直线,图 14c 为实际收获场景下的小麦收获导航线的示意图。

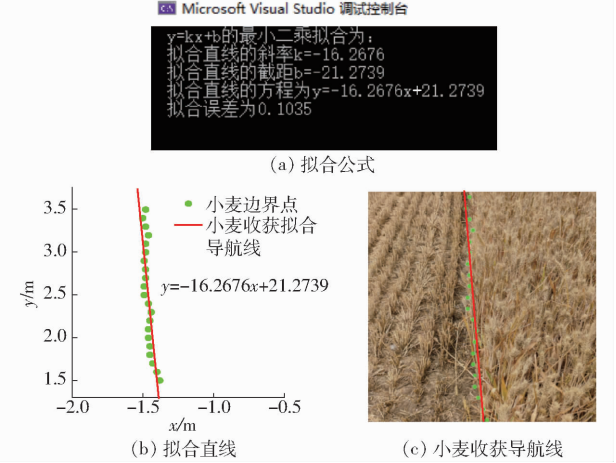


图 14 最小二乘法拟合图

Fig. 14 Least square fitting diagrams

小麦收获拟合导航线与车体坐标系下的 Z 轴之间的夹角 α 可以表示为

$$\alpha = \arctan k \tag{11}$$

若 α 为正,则拟合导航线的方向为右,联合收获机应向右调整方向;若 α 为负,则拟合导航线的方向为左,联合收获机应向左调整方向。

小麦收获过程中进行导航线拟合主要是为收获机辅助导航提供依据,及时调整前进方向,进而保证小麦的满幅收获。判断小麦拟合导航线精确度的两个指标分别为前进方向偏差角和割台横向偏差。

前进方向偏差角表示为拟合得到的小麦收获导航线与实际的小麦收获导航线之间的夹角,如图 15a 所示。若实际小麦收获导航线公式为

$$y_0 = k_0x + b_0 \tag{12}$$

则前进方向偏差角 ε 可表示为

$$\varepsilon = \arctan k_0 - \arctan k \tag{13}$$

割台横向偏差定义为割台边界点与小麦收获导航线在割台横向方向上的距离,如图 15b 所示。若联合收获机边界点在 X 方向上的坐标值为 m ,小麦收获导航线在割台及其延长线上交点在 X 轴方向上的坐标值为 n ,那么,割台横向偏差 d 即可表示为

$$d = n - m \tag{14}$$

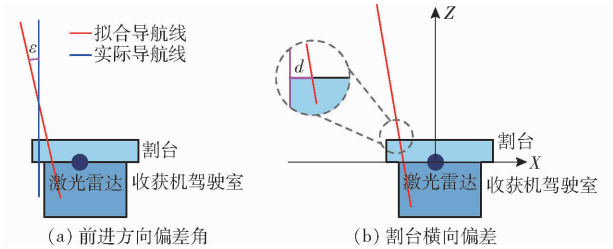


图 15 偏差定义示意图

Fig. 15 Schematics of deviation definition

3 试验结果与分析

3.1 小麦激光点云获取

2023 年 6 月,在山东省青岛市即墨区段泊岚镇小麦种植试验田开展试验,利用三维激光雷达和 IMU 获取联合收获机收获前方小麦作物点云数据。

作业前,首先采集静态环境下不同区域成熟期小麦高度和割茬高度,共采集 10 组不同区域成熟期小麦作物高度和割茬高度并计算平均值,小麦平均高度为 78.25 cm,小麦割茬平均高度为 19.72 cm,如表 2 所示。

表 2 小麦作物高度和割茬高度

Tab. 2 Statistics of wheat height and stubble height
cm

区域 编号	小麦高度	割茬高度	小麦高度 平均值	割茬高度 平均值
1	77.2	19.7	78.25	19.72
2	73.1	20.1		
3	78.2	20.5		
4	84.3	19.6		
5	72.6	19.6		
6	80.3	19.3		
7	79.4	20.2		
8	75.5	18.8		
9	79.1	19.6		
10	77.8	19.8		

实际收获过程中,激光雷达实时获取前方感兴趣区域内小麦点云信息,感兴趣区域宽度为 2 m,联合收获机作业速度为 1.2 m/s,利用本文算法提取小麦收获导航线每帧耗时为 0.533 s,可以应用于实际收获场景。

3.2 小麦收获导航线获取

为验证该算法准确精度,验证其在不同收获场景下的作业精度,主要包括小麦种植稀疏、其他作物共存、田垄过高、地边存在杂草、小麦缺失等多种情况下小麦收获导航线拟合情况,其拟合结果如图 16 所示。

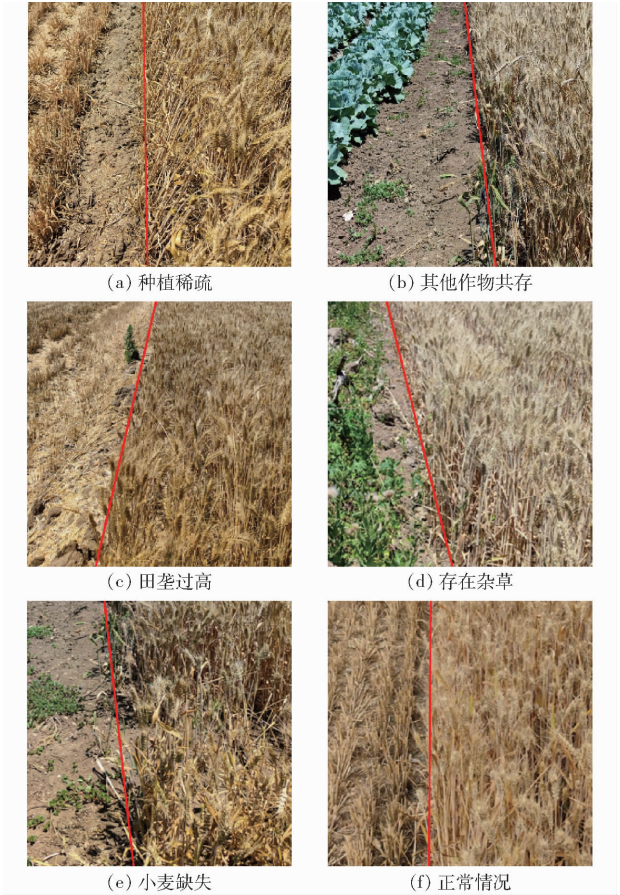


图 16 不同收获场景下导航线示意图

Fig. 16 Navigation line under different harvest scenarios

根据不同情况下获取的小麦收获导航线,计算前进方向偏差角和割台横向偏差。采用人工标注的方法获取实际的小麦收获导航线,采用人工测量的方法得到割台与作物之间实际横向偏差,如表 3 所示。

表 3 小麦收获导航线误差

Tab. 3 Statistics of navigation line error of wheat harvest

数据编号	前进方向偏 差角 $\varepsilon/(\circ)$	计算割台横 向偏差 d/m	实际割台横 向偏差 d'/m	绝对误差/ m
图 15a	1.217	0.113	0.045	0.068
图 15b	0.856	0.136	0.079	0.057
图 15c	1.015	0.146	0.101	0.045
图 15d	0.952	0.121	0.084	0.037
图 15e	1.118	0.135	0.062	0.073
图 15f	0.783	0.082	0.036	0.046
平均值	0.986	0.122	0.068	0.054

由表 3 可知,前进方向偏差角平均为 0.986° ,

计算得到和实际的割台横向偏差量之间的平均绝对误差为 0.054 m,表示本文小麦导航线拟合程度较好。

为了判断该算法相较于其他算法的准确率,将其与基于纯高度阈值法提取作物导航线的算法进行比较。选取联合收获机收获小麦获取的 300 帧点云,分别采用八邻域高程差算法和纯高度阈值法算法进行小麦导航线的拟合。

八邻域高程差的栅格比较阈值设置为 0.5 m,即邻域栅格内若在 Z 轴方向上的差值大于 0.5 m,则表示该栅格内存在边界点,标记该栅格坐标作为候选边界点;纯高度阈值法高度阈值为 0.7 m,即在 X 轴方向上从左至右遍历每一条激光,若存在某一激光点的在 Z 轴方向上的数值大于 0.7 m,则标记该点作为候选边界点。两种算法得到的拟合导航线结果如表 4 所示。

表 4 不同算法拟合小麦收获导航线结果

Tab.4 Different algorithms fitting wheat navigation line results

算法	line results				
	前进方向偏 差角平均值	割台 横向偏 差/m	平均 绝对 误差/m	准确 率/ %	平均 耗时/ (s·f ⁻¹)
	$\varepsilon/(^{\circ})$	差/m	误差/m	%	(s·f ⁻¹)
八邻域高程差	0.872	0.104	0.039	93.5	0.533
纯高度阈值法	2.795	0.157	0.074	88.4	0.924

与纯高度阈值法相比,本文算法计算得到的小麦收获导航线平均偏差角减少 1.923°,平均横向偏差减少 0.053 m,准确率提高 5.1 个百分点,平均耗时减少 0.391 s/f,效率较高。图 17 为某一帧点云下两种不同方法获取的导航线结果。

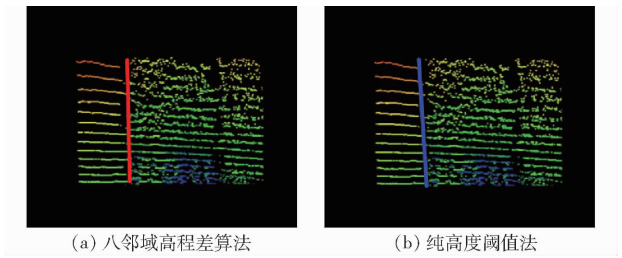


图 17 不同算法拟合导航线结果示意图

Fig.17 Schematics of fitting navigation line results with different algorithms

4 结论

(1)利用激光雷达和 IMU 获取联合收获机收获过程中前方作物的点云信息,IMU 可实时提供联合收获机的姿态信息,能够补偿由于收获机颠簸引起的微小误差。获取的三维点云利用坐标变换、ROI 裁剪、点云滤波、栅格划分和八邻域高程差算法得到候选边界点,并利用最小二乘法拟合得到收获导航线。

(2)试验结果表明,本文算法最终得到的收获导航线,前进方向偏差角平均值为 0.872°,割台横向偏差为 0.104 m,收获导航线准确率为 93.5%,可为联合收获机工作提供辅助导航,提高无人驾驶的准确率。

(3)由对比试验可知,本文算法相较于纯高度阈值算法,平均偏差角减少 1.923°,平均横向偏差减少 0.053 m,准确率提高 5.1 个百分点,平均耗时减少 0.391 s/f。该算法明显优于纯高度阈值法,可为实际情况下无人驾驶提供辅助导航,提高作业精度。

参 考 文 献

[1] 刘婵韬,李小龙,徐岚俊,等. 农机无人驾驶技术现状及发展前景[J]. 农机科技推广,2020(12):22-24.

[2] 韩树丰,何勇,方慧. 农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2018,44(4):381-391.

HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences), 2018,44(4):381-391. (in Chinese)

[3] 翟志强,朱忠祥,杜岳峰,等. 基于 Census 变换的双目视觉作物行识别方法[J]. 农业工程学报,2016,32(11):205-213.

ZHAI Zhiqiang, ZHU Zhongxiang, DU Yuefeng, et al. Method for detecting crop rows based on binocular vision with Census transformation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 205-213. (in Chinese)

[4] HIDA M, IKEMURA Y, SUGURI M, et al. Cut-edge and stubble detection for auto-steering system of combine harvester using machine vision science direct[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26):145-150.

[5] BENSON E R, REID J F, ZHANG Q. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(4):389-398.

[6] 关卓怀,陈科尹,丁幼春,等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J]. 农业机械学报,2020,51(1):19-28.

GUAN Zhuohuai, CHEN Keyin, DING Youchun, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):19-28. (in Chinese)

[7] 侯加林,蒲文洋,李天华,等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报,2020,36(14):80-88.

HOU Jialin, PU Wenyang, LI Tianhua, et al. Development of dual-LiDAR navigation system for greenhouse transportation robot[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 80-88. (in Chinese)

- [8] 刘星星,张超,张浩,等. 最小二乘法与 SVM 组合的林果行间自主导航方法[J]. 农业工程学报,2021,37(9):157–164. LIU Xingxing, ZHANG Chao, ZHANG Hao, et al. Inter-row automatic navigation method by combining least square and SVM in forestry[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 157–164. (in Chinese)
- [9] CHOI J M, YIN X, YANG L L, et al. Development of a laser scanner-based navigation system for a combine harvester[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(1): 7–13.
- [10] 杨洋,马强龙,陈志桢,等. 激光雷达实时提取甘蔗垄间导航线[J]. 农业工程学报,2022,38(4):178–185. YANG Yang, MA Qianglong, CHEN Zhizhen, et al. Real-time extraction of the navigation lines between sugarcane ridges using LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(4): 178–185. (in Chinese)
- [11] 曾宏伟,雷军波,陶建峰,等. 低对比度条件下联合收割机导航线提取方法[J]. 农业工程学报,2020,36(4):18–25. ZENG Hongwei, LEI Junbo, TAO Jianfeng, et al. Navigation line extraction method for combine harvester under low contrast conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 18–25. (in Chinese)
- [12] LUO Y, WEI L, XU L, et al. Stereo-vision-based multi-crop harvesting edge detection for precise automatic steering of combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 115–128.
- [13] 魏新华,张敏,刘青山,等. 基于双目视觉的田间作物高度和收割边界信息提取[J]. 农业机械学报,2022,53(3):225–233. WEI Xinhua, ZHANG Min, LIU Qingshan, et al. Extraction of crop height and cut-edge information based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 225–233. (in Chinese)
- [14] ZHAO T, NOGUCHI N, YANG L L, et al. Development of uncut crop edge detection system based on laser rangefinder for combine harvesters[J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2016, 9(2): 21–28.
- [15] 伟利国,张小超,汪凤珠,等. 联合收割机稻麦收获边界激光在线识别系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊):30–35. WEI Ligu, ZHANG Xiaochao, WANG Fengzhu, et al. Design and experiment of harvest boundary online recognition system for rice and wheat combine harvester based on laser detection[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.): 30–35. (in Chinese)
- [16] 尚业华,王昊,孟志军,等. 基于激光雷达的稻麦收获边界检测与自动对齐系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(5):19–28,46. SHANG Yehua, WANG Hao, MENG Zhijun, et al. Rice and wheat harvesting boundary detection and automatic alignment system based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 19–28, 46. (in Chinese)
- [17] 王鹏,李广云,王力,等. 利用平面特征的激光雷达相对位姿标定方法[J]. 测绘科学技术学报,2021,38(6):611–617. WANG Peng, LI Guangyun, WANG Li, et al. Relative pose calibration method of LiDAR based on plane features[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(6): 611–617. (in Chinese)
- [18] 杨军建,吴良才. 基于 RANSAC 算法的稳健点云平面拟合方法[J]. 北京测绘,2016(2):73–75,79.
- [19] 陈斌斌,曹其新. 基于激光和 IMU 的农田作物高度及边界检测[J]. 机电一体化,2020(增刊):46–51. CHEN Binbin, CAO Qixin. Grain height and boundary detection based on laser and IMU[J]. Mechatronics, 2020(Supp.): 46–51. (in Chinese)
- [20] 张刚,马强龙,马标,等. 基于激光雷达传感器的小麦收获导航线实时检测[J]. 农业开发与装备,2022(2):19–22.
- [21] 赵腾. 基于激光扫描的联合收割机自动导航方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [22] 杨洋,李明. 基于混合滤波和 DBSCAN 的点云去噪算法[J]. 计量与测试技术,2020,47(4):24–27. YANG Yang, LI Ming. A point cloud denoising method based on a hybrid filtering and density clustering algorithm[J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47(4): 24–27. (in Chinese)
- [23] 魏硕,赵楠翔,李敏乐,等. 结合改进 DBSCAN 和统计滤波的单光子去噪算法[J]. 激光技术,2021,45(5):601–606. WEI Shuo, ZHAO Nanxiang, LI Minle, et al. Single photon denoising algorithm combined with improved DBSCAN and statistical filtering[J]. Laser Technology, 2021, 45(5): 601–606. (in Chinese)
- [24] 张志佳,魏信,周自强,等. 一种基于八邻域深度差的点云边缘提取算法[J]. 仪器仪表学报,2017,38(8):2015–2021. ZHANG Zhijia, WEI Xin, ZHOU Ziqiang, et al. 8N-DD-based point cloud edge extraction algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2015–2021. (in Chinese)
- [25] 张艳莉. 基于最小二乘法拟合直线的研究[J]. 信息通信,2014(11):44–45. ZHANG Yanli. The research of fitting straight-line least square method[J]. Information & Communications, 2014(11): 44–45. (in Chinese)