

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.008

# 基于全站仪的插秧机卫星导航作业精度检验方法

赵祚喜 罗阳帆 马昆鹏 宋俊文 谈婷 蒙劭洋

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 由于田间作业环境复杂,插秧机卫星自动导航工作时 GPS 数据不能准确反映秧苗位置,达不到相应的作业要求。为此,提出一种利用全站仪检验秧苗路径的方法,检验插秧机的作业精度。通过研究全站仪单点静态测量所获取的秧苗点数据,得到秧苗路径的直线度和秧苗路径的对行精度,进而评估插秧机的作业精度。对相关数据进行分析可得:秧苗路径直线度的最小值和最大值分别为 3.08、4.93 cm,最小和最大均方根误差分别为 4.299、6.263 cm;秧苗路径的对行精度最小值和最大值分别为 5.17、15.53 cm,最小和最大均方根误差分别为 4.29、5.43 cm。结果表明,该方法可实现对农机田间自动导航作业精度的量化评估。

**关键词:** 全站仪; 插秧机; 卫星导航; 秧苗路径; 作业精度

**中图分类号:** S223.91      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0050-07

## Satellite Navigation Operating Accuracy Testing Method of Rice Transplanter Based on Total Station

ZHAO Zuoxi LUO Yangfan MA Kunpeng SONG Junwen TAN Ting MENG Shaoyang  
(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Due to the complicated working environment in the field, the GPS data cannot accurately reflect the position of the seedlings during the automatic navigation of the rice transplanter, and may not meet the corresponding operational requirements. Therefore, in order to verify the accuracy of the satellite navigation operation of the rice transplanter, a method of using the total station to test the seedling path was proposed to verify the accuracy of the transplanter. By studying the data of the seedling point obtained by the single-point static measurement of the total station, the straightness of the seedling row and the parallel accuracy of the seedling rows were obtained, and the operation precision of the transplanter was evaluated. From the analysis of relevant data, the minimum and maximum values of the straightness of the seedling row were 3.08 cm and 4.93 cm, respectively, and the minimum and maximum root mean square error were 4.299 cm and 6.263 cm, respectively; the minimum and maximum values of parallel accuracy of seedling rows were 5.17 cm and 15.53 cm, respectively, and the minimum and maximum root mean square errors were 4.29 cm and 5.43 cm, respectively. The results showed that the method can achieve quantitative evaluation of the accuracy of automatic navigation operations in agricultural machinery fields.

**Key words:** total station; transplanter; satellite navigation; seedling path; operation accuracy

## 0 引言

全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)技术是精准农业技术体系中的关键技术之一,是实现精准农业作业的基础。农业机械应用卫星导航自动驾驶技术,不但可以减轻驾驶员劳

动强度,还可提高工作效率。但田间作业环境复杂,农机导航作业的作业精度也受到影响。目前市场上的导航产品种类多样<sup>[1]</sup>,其导航作业精度参差不齐<sup>[2-3]</sup>,为检验评估导航产品能否满足农机田间导航作业精度的要求,需要对农机的作业效果进行评估测试<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2019-04-25 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700101-02、2017YFD0700400)和广东省教育厅省级重大科研项目(2016KZDXM027)

作者简介: 赵祚喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机控制与车辆自动驾驶技术研究,E-mail: zhao\_zuoxi@hotmail.com

目前,国内外对农机田间导航作业精度尚无统一、规范的评估方法和指标。国外主要通过研究农作物的相关参数来评估农机导航自动驾驶作业精度,常用均值、标准差和均方根误差等统计值作为评价标准<sup>[5-12]</sup>。我国现阶段采用的农机导航产品大都来自于国外导航技术的成熟产品,对农机导航自动驾驶作业精度的研究较少,主要研究分析卫星定位的精度<sup>[13-22]</sup>。此外,当前对农机导航作业精度检测通常采用人工测量方法<sup>[22]</sup>,效率低,且产生的随机误差较大。

本文利用高精度全站仪、采用单点静态定位的测量方法,对广州增城华南农业大学试验区插秧机自动导航驾驶作业的实际情况进行试验研究,对插秧机卫星导航田间自动驾驶作业效果进行检测,进而评估插秧机卫星导航作业的精度,检验其能否满足农机卫星导航田间作业精度的要求。

## 1 试验条件及方法

### 1.1 试验条件

本试验以南方水稻田作为研究场地,在广州增城华南农业大学试验基地进行插秧机自动导航作业。根据南方水稻田的特点,本次试验插秧机自动导航以车速 0.75 m/s 进行作业,选取 6 行作业路线,每行作业约 100 m,测点间距为 2 m。试验前,使用安装美国约翰迪尔卫星导航自动驾驶系统的并关插秧机在其他试验场地已经完成了田间作业。

试验设备主要有:约翰迪尔 StarFire 卫星信号接收器、GreenStar2630 显示器以及 AutoTrac 转向套件和连接线束、全站仪、3 米卷尺、标记签若干。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验设计

根据并关插秧机卫星导航自动驾驶作业的特点,插秧机有 8 个秧爪,其在试验田能同时插 8 行秧苗,故选定一个秧爪的秧苗数据作为每组测试对象。测试地段选在试验地块的中段,距地块地头约 10 m。每相隔 2 m 的地方设定 1 个测量点并用标记签作标记,每组设置 40 个测量点,而被测量的秧苗路径长度约为 80 m。在测量点标定后,在试验田埂架好全站仪,调平后按组进行逐点测量,记录相关数据。插秧机卫星导航自动驾驶作业过程示意图如图 1 所示。其中  $d_0$  为相邻两行秧苗路径实际间距, $L_0$  为测量点间距。

#### 1.2.2 仪器测量精度

本试验需要一套全站仪设备,利用全站仪对秧苗点进行静态定位测量,所以全站仪本身的点定位精度直接决定试验结果的准确性和可靠性。本次试

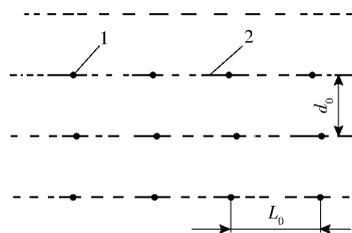


图 1 插秧机卫星导航自动驾驶田间作业测试方法示意图

Fig. 1 Sketch of test method of automatic driving field operation of rice transplanter based on satellite navigation

1. 测量点 2. 秧苗路径

验采用 KOLIDA 全站仪,为检验其测量精度是否满足试验测量的需求,结合生产企业所给的相关参数以及在华南农业大学校园里进行 KOLIDA 全站仪静态点定位精度测试试验,表明在测距小于 100 m 的情况下,KOLIDA 全站仪的静态点定位精度为 2 ~ 3 mm,说明其在测量静态点时定位精度高,测量结果可靠,能满足本试验测量要求。

### 1.3 评估指标

根据插秧机作业的特点,本研究选用插秧机作业后的秧苗路径直线度和秧苗路径的对行精度作为评估指标来表征插秧机卫星导航自动驾驶作业精度。目前,国外研究农机卫星导航作业精度常针对作物的位置特征进行统计,采用平均值、标准差(SD)、均方根误差(RMSE)和极值等评价指标进行评估。而在国内为评价农机作业质量常采用地面平整度、作业重合率、漏播率及收割损失率等指标进行研究。

#### 1.3.1 路径直线度

为直观反映插秧机卫星导航自动驾驶直线行驶程度,本次试验采用秧苗路径的直线度表征。插秧机导航自动驾驶直线来回作业,用每组所有的测量点分别与该组测量点线性拟合直线的偏差绝对值的平均值表示路径直线度。秧苗路径的直线度在一定程度上反映了插秧机导航自动驾驶作业精度,其值越小表明插秧机卫星导航作业直线行驶的精度越高,田地利用率越好,作业质量越好;反之,则表明插秧机导航作业精度越低,田地利用率越差,作业质量不佳。

考虑田间作业环境复杂等实际因素,插秧机在导航自动驾驶作业时,其作业实际的路径不可能为一条直线,但插秧机在作业时会以一条基准线作为跟踪线,同时导航系统在作业过程中会根据田间的位置信息不断修正插秧机的前进路线。本研究通过对各行测量点拟合直线的求解进而研究插秧机导航自动驾驶的基准跟踪线,通过计算可得出各测量点

到线性拟合直线的偏移量,求得每行秧苗路径的直线度,如图2所示。其中 $d_{ij}$ 为实际测量点间距, $\Delta X_{ij}$ 为偏差。

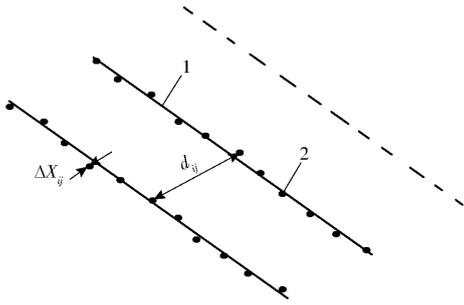


图2 秧苗路径直线度计算方法示意图

Fig. 2 Sketch of calculation method for straightness of seeding row

1. 线性回归拟合基准线 2. 测量点

利用最小二乘法原理将测量点进行线性拟合,假设每组测量点的拟合方程为 $Y = AX + B$ ,而各测量点到拟合直线的偏移量计算公式为

$$\Delta X_{ij} = \frac{AX_{ij} - Y_{ij} + B}{\sqrt{A^2 + 1}} \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$ ——所选取测量点拟合直线方程的斜率和截距

$\Delta X_{ij}$ ——第 $i$ 组第 $j$ 个测量点到第 $i$ 组拟合直线的偏移量

$X_{ij}$ 、 $Y_{ij}$ ——第 $i$ 组的第 $j$ 个测量点的 $X$ 、 $Y$ 轴坐标值

当 $AX_{ij} - Y_{ij} + B = 0$ 时,该测量点在对应的拟合直线上,是最理想的作业效果;当 $AX_{ij} - Y_{ij} + B \neq 0$ 时,测量点在对应拟合直线的两侧,存在作业偏差。

为求得秧苗路径的直线度,对测量点的相关数据进行分析,可先将所有求得的 $\Delta X_{ij}$ 进行算术平均即可得到第 $i$ 行秧苗路径的直线度,相应公式为

$$R_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} |\Delta X_{ij}| \quad (2)$$

再求得本次试验的秧苗路径直线度 $R$ ,公式为

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} |\Delta X_{ij}| \right) \quad (3)$$

式中  $n_i$ ——第 $i$ 组和第 $i+1$ 组两相邻秧苗路径上对应点数

$N$ ——测量组数

理论上, $R$ 为0时,测量点全部都与拟合直线重合,可以表明插秧机导航自动驾驶达到最理想状态; $R$ 值越小,说明测量点在拟合直线上的数目越多,插秧机导航自动驾驶作业精度就越高,作业的效果好,相应的作业质量也越好;反之, $R$ 值较大,说明插秧机导航自动驾驶作业质量不佳。

### 1.3.2 对行精度

秧苗路径的对行精度可以作为评价插秧机卫星导航自动驾驶作业结合线精度的指标。在试验中插秧机导航自动驾驶直线来回作业,一般用相邻两行对应测量点的间距与实际秧苗行间距差值的算术平均值表征秧苗路径的对行精度。秧苗路径的对行精度值越小,表明相邻两行秧苗间的结合线精度越高,田地的利用率越好,作业质量越好;而秧苗路径的对行精度值越高,说明相邻两行秧苗之间的结合线精度越低,田地利用率低,作业质量差。

根据插秧机在田间的实际工作情况,秧苗的实际路径不可能呈一条直线,求相邻两行秧苗距离即求解垂直于秧苗纵向的相邻两行秧苗路径上对应测量点间距离。在田间进行试验测量秧苗数据点时,因为相邻两行秧苗间的对应点是由测量人员在视觉上判断相应测量点是否在秧苗路径的垂直方向上,存在测量误差,因此直接利用所测得的秧苗数据计算得到的结果是不可靠的。为解决这一问题,本研究将两相邻路径视为直线,用全站仪测量所得的秧苗数据点的拟合直线代替,用来简化计算,可以求得测量点到拟合直线间的距离,进而求得相邻两行秧苗路径的对行精度。如图3所示。

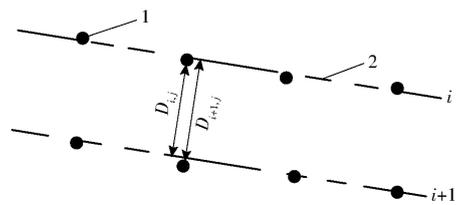


图3 秧苗路径对行精度计算方法示意图

Fig. 3 Sketch of calculation method for parallel accuracy of seeding rows

1. 测量点 2. 基准直线

假设秧苗数据点的拟合直线方程为 $y = ax + b$ ,则测量点到另一行秧苗数据拟合基准直线间的距离计算公式为

$$D_{i,j} = \frac{ax_{ij} - y_{ij} + b}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (4)$$

式中  $a$ 、 $b$ ——所选取测量点对应另一行秧苗点拟合直线方程的斜率和截距

$D_{i,j}$ ——第 $i$ 行第 $j$ 个测量点到第 $i+1$ 行测量点数据拟合直线的距离

同理可求得第 $i+1$ 行第 $j$ 个测量点到第 $i$ 行测量点数据拟合直线的距离 $D_{i+1,j}$ 。每组秧苗路径的对行精度计算的相关公式为

$$P_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} |C| \quad (5)$$

其中

$$C = D_{i+1,j} - D_{i,j}$$

进而求得本次试验插秧机卫星导航作业的平行度

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (6)$$

$|C|$ 值越大,即  $D_{i+1,j}$ 与  $D_{i,j}$ 相差越大,相邻两行秧苗路径的平行程度越差,作业质量不佳;当  $|C|$ 值越接近 0 时,即  $D_{i+1,j}$ 与  $D_{i,j}$ 相差越小,相邻两行秧苗路径的平行程度越好,作业质量越好,当  $C=0$  时是插秧机导航自动驾驶最理想状态,作业效果最佳。即  $P$  值越小,表明秧苗路径平行程度越高,插秧机导航自动驾驶作业时结合线精度越高,田地利用率越好,作业效果越佳;反之,作业效果差,不适于实际生产过程。当  $P=0$  是插秧机自动驾驶作业最理想的作业

状态。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 秧苗路径分析

在研究插秧机作业质量时不考虑秧苗高度情况,故只针对秧苗在二维平面的位置进行分析。为直观反映秧苗的实际情况,以便在试验预处理和评估时对采集的测量点数据进行初步的判定,将全站仪位置(测量位置)设为原点,利用 Matlab 软件直接建立秧苗路径每行测量点的轨迹图(图 4)。从秧苗路径每行测量点轨迹图中可见,各组测量点均呈线性关系,并基本保持平行。

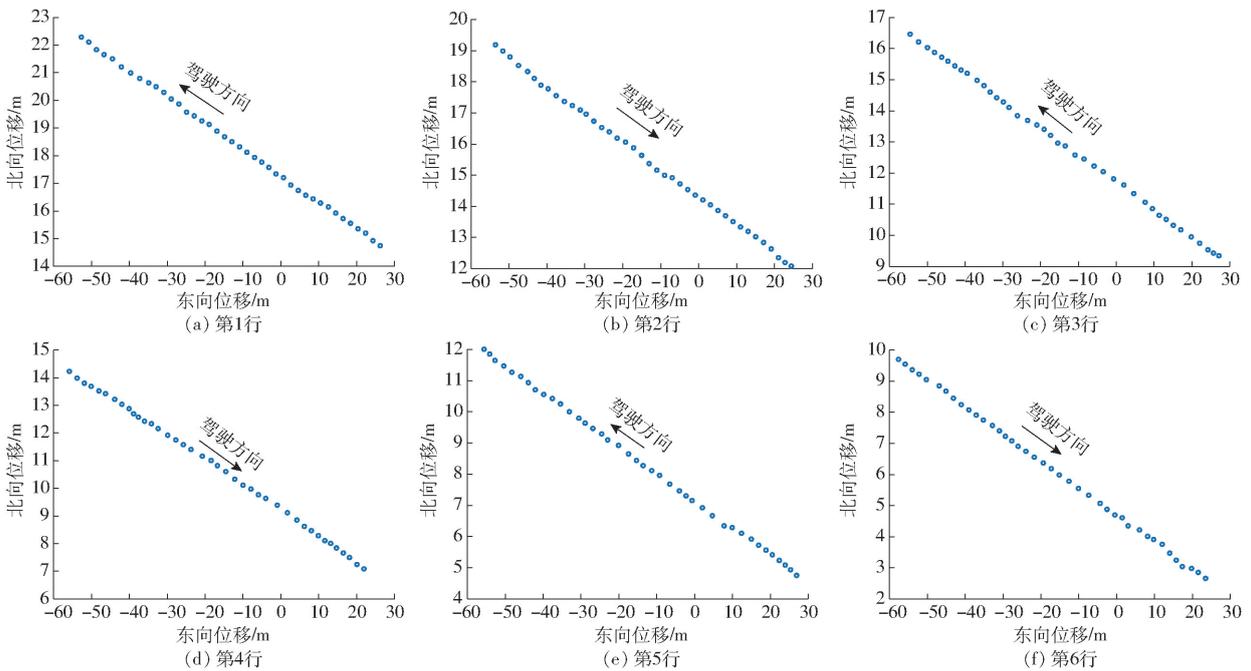


图 4 全站仪测量得到的秧苗轨迹

Fig. 4 Locus of seeding measured by total station

### 2.2 评估指标分析

先将全站仪获取的数据进行预处理,变为平面直角坐标系下的数据后,再对其进行分析处理和评估。本文在采用秧苗路径直线度和秧苗路径的对行精度评估插秧机卫星导航驾驶作业精度的同时,还选用了均值、均方根误差、标准差等指标进行描述。

#### 2.2.1 秧苗路径直线度分析

对各组秧苗路径进行直线度分析,先将全站仪测量得到的各组数据点进行线性拟合,形成一条拟合直线,并求得各组拟合直线的方程表达式,然后以拟合直线为基准利用公式(1)计算得到各组直线的横向偏差,再利用公式(2)求得各组秧苗路径的直线度,最后针对数据的均值、均方根误差、标准差以及作业的决定系数( $R^2$ )等指标进行分析,计算结果见表 1。

表 1 插秧机田间导航自动驾驶作业精度评估结果

Tab. 1 Evaluation index of accuracy of automatic driving operation in rice transplanter

行 序号	直线度/ cm	标准差/ cm	均值/ cm	均方根 误差/cm	决定 系数
1	3.49	4.436	$-1.371 \times 10^{-4}$	4.572	0.999 6
2	4.64	5.719	$-2.677 \times 10^{-4}$	5.891	0.999 2
3	3.67	4.699	$4.38 \times 10^{-5}$	4.839	0.999 5
4	4.93	6.080	$-4.68 \times 10^{-5}$	6.263	0.999 2
5	3.42	4.175	$-4.57 \times 10^{-5}$	4.299	0.999 6
6	3.08	4.403	$4.720 \times 10^{-4}$	4.534	0.999 6

由表 1 可知,本次试验测量所得的每行秧苗路径的直线度都小于 5 cm,标准差和均方根误差都小于 6.27 cm,且各行的作业决定系数  $R^2$  均很接近 1,说明各测量点拟合效果好,测量点之间的关系更近于一条直线。在本试验中,由于测量点均匀分布在

拟合基准直线的两侧,导致均值很小,不能反映插秧机田间导航直线自动驾驶精度;本试验所得到的秧苗路径直线度均超出了约翰迪尔自动驾驶系统所公布的数值,是由于田间环境复杂,直线度反映插

秧机导航自动驾驶作业后的精度,而约翰迪尔所公布的数据是导航系统自身的精度。

为进一步直观反映插秧机各行导航直线作业情况,分别将各组数值的偏差进行统计,结果如图5。

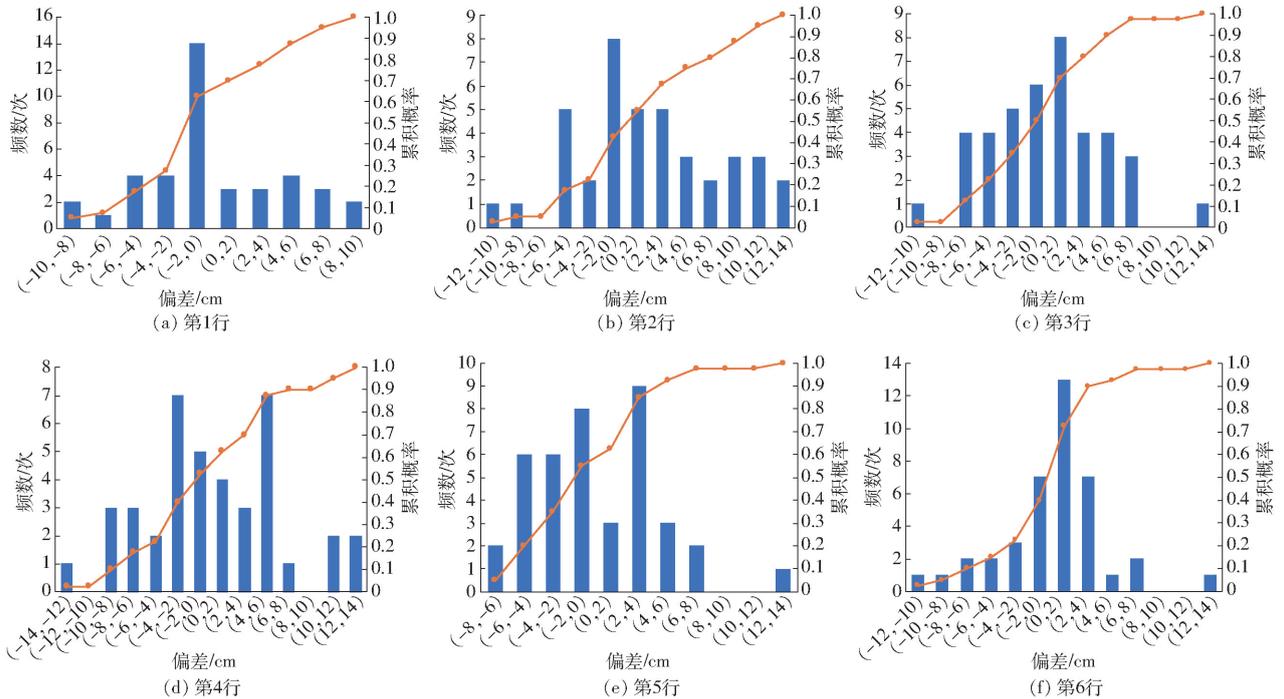


图5 每行秧苗路径偏差统计结果

Fig. 5 Deviation statistics of seeding row

由图5可知,每行秧苗路径的偏差主要集中于 $\pm 4$  cm之间,其中第6行和第1行秧苗路径偏差较集中,作业效果好,第5行和第2行次之,第3行与第4行不理想,可以初步判断插秧机在第1行和第6行直线作业时的精度最高,第3行和第4行的作

业效果最不理想。

## 2.2.2 秧苗路径对行精度分析

由数理统计分析,可得各行秧苗数据的拟合直线方程的斜率,如表2。

由表2可知,本次试验在南方水稻田里测量的

表2 秧苗数据拟合直线方程的斜率

Tab. 2 Slope of reference line equation for seeding data

参数	行序号					
	1	2	3	4	5	6
测量距离 $l_i/m$	79.30	78.33	82.00	78.14	82.85	81.40
斜率	-0.094 974	-0.089 097	-0.087 446	-0.907 72	-0.086 406	-0.087 063

秧苗距离在78~83 m之间,所得到的6行秧苗数据拟合直线的斜率都集中在 $-0.095 0 \sim -0.086 4$ 之间,相差较小,平行情况较为良好。

为直观反映秧苗路径间的平行关系,本研究将相邻两行秧苗数据作为一组研究对象,将两相邻路径视为直线,用全站仪测量所得的秧苗数据点的拟合直线代替,用来简化计算,利用式(4)可以求得测量点到拟合直线间的距离,然后再利用式(5)求得相邻两行秧苗路径间的平行精度;最后针对数据的均值、均方根误差、标准差等指标进行分析,计算结果见表3。

表3 插秧机田间导航自动驾驶作业精度评估指标

Tab. 3 Evaluation index of accuracy of automatic driving operation in rice transplanter

组号	对行精度	标准差	均值	均方根误差
1	6.09	14.55	$-8.850 \times 10^{-3}$	5.12
2	5.78	6.56	$-9.000 \times 10^{-5}$	5.23
3	15.53	18.97	$-8.273 \times 10^{-2}$	5.43
4	14.79	21.45	$-7.495 \times 10^{-2}$	5.21
5	5.17	4.59	$1.830 \times 10^{-3}$	4.29

由表3可知,均方根误差都小于5.5 cm,说明插秧机卫星导航在田间基本按基准直线平行作业,作业情况较好;第3组和第4组的对行精度、均值和标

准差较大,说明第3组和第4组的平行精度最差。

为进一步提高秧苗路径对行精度评估结果的准确性和真实性,针对第3组和第4组做了补充试验。即对第3行和第5行数据进行分析,结果为:对行精度4.04 cm,标准差5.15 cm,均值 $7.8 \times 10^{-4}$  cm,均方根误差4.44 cm。因此可知,第3行与第5行间的对行精度、标准差、均值、均方根误差都较小,表明这两行秧苗平行情况良好。由此可以推断第4行秧苗的作业效果最差。

### 2.3 评估结果分析

本研究通过对秧苗路径的直线度以及秧苗路径对行精度的研究,结合拟合直线的相关系数以及拟合直线的方程,多角度地评价了插秧机卫星自动驾驶作业质量。在本次试验研究的6行秧苗路径中,直线度的最小值和最大值分别为3.08、4.93 cm,最小和最大均方根分别为4.299、6.263 cm;秧苗路径的对行精度最小值和最大值分别为5.17、15.53 cm,最小和最大均方根误差为4.29、5.43 cm。根据秧苗

路径的直线度以及秧苗路径的对行精度可得出,本次试验插秧机卫星自动驾驶作业情况最好的是第6行,第4行的作业效果最差,出现这种原因可能是插秧机在第4行的工作环境不理想,导致插秧机的轮胎发生侧移造成。

### 3 结论

(1)提出了秧苗路径直线度和秧苗路径对行精度两个评价指标,可以实现对插秧机卫星自动驾驶的作业质量进行量化评估。

(2)本试验利用全站仪采集得到的数据是准确、有效的。对利用全站仪静态测量6行秧苗点所得到的数据进行数理分析,可求得秧苗路径的直线度和路径间平行度,且能反映出秧苗的分布情况,进而评价试验的作业效果。

(3)试验的测试结果与实际作业情况相符,本研究提出的检验插秧机卫星自动驾驶作业质量的方法可行。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋天小,赵金峰,郭瑞宇,等.北斗导航系统在精细农业系统中的应用[J].数字通信世界,2016,3(2):9-12. JIANG Tianxiao,ZHAO Jinfeng, GUO Ruiyu, et al. Application of Beidou navigation system in precision agriculture system[J]. Digital Communication World,2016,3(2):9-12. (in Chinese)
- [2] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动驾驶技术进展[J].农业工程学报,2015,31(10):1-10. HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- [3] 姬长英,周俊.农业机械导航技术发展分析[J].农业机械学报,2014,45(9):44-54. JI Changying,ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):44-54. (in Chinese)
- [4] 何杰,朱金光,张智刚,等.水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):17-24. HE Jie,ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):17-24. (in Chinese)
- [5] HAN S F,ZHANG Q,NOH H, et al. A dynamic performance evaluation method for DGPS receivers under linear parallel-tracking applications[J]. Transactions of the ASAE,2004,47(1):321-329.
- [6] NAGASAKA Y, SAITO H, TAMAKI K, et al. An autonomous rice trans-planter guided by global positioning system and inertial measurement unit [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 537-548.
- [7] YAO L,LI L,ZHANG M, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles based on global positioning system [J]. Artificial Intelligence Applications and Innovations,2005,187: 617-624.
- [8] NAGASAKA Y. A global positioning system guided automated rice transplanter[C]//Agricontrol, 2013:41-46.
- [9] MACĀK M, ŽITŇĀK M, NOZDROVICKÝ L. Using satellite navigation for seeding of wide-row and narrow-row crops[J]. Research Agricultural Engineering,2011,57:7-13.
- [10] PÉREZ-RUIZ M,CARBALIDO J,AGÜERA J, et al. Asesing GNSS corection signals for asisted guidance systems in agricultural vehicles[J]. Precision Agricultural,2011,12(5):639-652.
- [11] PÉREZ-RUIZ M,SLAUGHTERD C, GLIEVER C J. Automatic GPS based intra-row wed knife control system for transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2012,80:41-49.
- [12] MAGAR A P, SINGH M, MAHAL J S, et al. Efficient tractor operation through satellite navigator[J]. Scientific Research and Essays,2014,9(17):768-777.
- [13] BS ISO 12188-2—2012 Tractors and machinery for agriculture and forestry: test procedures for positioning and guidance systems in agriculture: Part 2: testing of satellite-based auto-guidance systems during straight and level travel[S]. UK: BSI Standards Limited,2012.
- [14] 吉辉利,王熙.农机卫星导航自动驾驶作业精度评估试验的研究[J].中国农业大学学报,2017,22(11):148-156. JI Huili, WANG Xi. Accuracy evaluation on the automatic driving operation of agricultural machinery based on satellite

- navigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11):148-156. (in Chinese)
- [15] 丁幼春, 詹鹏, 周雅文, 等. 北斗定位田间信息采集平台运动控制器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):178-185.  
DING Youchun, ZHAN Peng, ZHOU Yawen, et al. Design and experiment of motion controller for information collection platform in field with Beidou positioning[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12):178-185. (in Chinese)
- [16] 刘焯韬, 徐俊俊, 李治国, 等. 农机自动导航驾驶系统在北京市的试验及推广建议[J]. 农业工程, 2015, 5(增刊):33-36.  
LIU Xingtao, XU Lanjun, LI Zhiguo, et al. Test and promotion suggestions of automatic navigation driving system for agricultural machinery in Beijing City[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(Supp.):33-36. (in Chinese)
- [17] 吉辉利, 王熙. 农机卫星定位导航精度评估方法研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(11):242-245.  
JI Huili, WANG Xi. The research of agricultural machinery is about satellite navigation accuracy of the evaluation method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11):242-245. (in Chinese)
- [18] 陈兵, 申俊飞, 何海, 等. 北斗卫星导航系统定位精度分析评估[J]. 导航定位学报, 2015, 3(1):1-9.  
CHEN Bing, SHEN Junfei, HE Hai, et al. The analysis and evaluation of BDS positioning accuracy [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015, 3(1):1-9. (in Chinese)
- [19] 周俊, 张鹏, 宋百华. 农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4):189-192.  
ZHOU Jun, ZHANG Peng, SONG Baihua. Analysis and modeling of GPS positioning error for navigation of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):189-192. (in Chinese)
- [20] 刘卉, 孟志军, 付卫强. 基于 GPS 轨迹的农机垄间作业重叠与遗漏评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):149-154.  
LIU Hui, MENG Zhijun, FU Weiqiang. Overlap and skip evaluation for agricultural machinery operation based on GPS track logs [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18):149-154. (in Chinese)
- [21] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6):147-152.  
MENG Zhijun, LIU Hui, WANG Hua, et al. Optimal path planning for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):147-152. (in Chinese)
- [22] DB23/T 207.8—2002 农业机械作业质量检查验收方法 [S]. 哈尔滨:黑龙江省技术质量监督局, 2002.

(上接第 86 页)

- [9] 刘涛, 孙成明, 王力坚, 等. 基于图像处理技术的大田麦穗计数[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2):282-290.  
LIU Tao, SUN Chengming, WANG Lijian, et al. In-field wheatear counting based on image processing technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):282-290. (in Chinese)
- [10] 张霖, 赵祚喜, 可欣荣, 等. 压电式种子计数系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8):41-45.  
ZHANG Lin, ZHAO Zuoxi, KE Xinrong, et al. Seed-counting system design using piezoelectric sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8):41-45. (in Chinese)
- [11] 文韬, 洪添胜, 李震, 等. 基于机器视觉的橘小实蝇运动轨迹跟踪与数量检测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):137-141.  
WEN Tao, HONG Tiansheng, LI Zhen, et al. Statistics and tracking of *Bactrocera dorsalis* based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10):137-141. (in Chinese)
- [12] 陈小亮, 李革, 徐岳平, 等. 高速水稻插秧机行走变速装置的研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(8):228-231.
- [13] 李革, 李辉, 方明辉, 等. 旋转式插秧机构非圆齿轮参数反求法求解[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8):46-49.  
LI Ge, LI Hui, FANG Minghui, et al. Non-circular gear parameters of rotary transplanting mechanism calculated by reverse method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8):46-49. (in Chinese)
- [14] 赵匀, 赵雄, 张玮炜, 等. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3):65-68.  
ZHAO Yun, ZHAO Xiong, ZHANG Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):65-68. (in Chinese)
- [15] 李革, 应孔月, 张继钊, 等. 基于秧针静轨迹的分插机构非圆齿轮求解[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1):64-71.  
LI Ge, YING Kongyue, ZHANG Jizhao, et al. Computation method of non-circular gear based on seedling needle tip point's static trajectory in transplanting mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1):64-71. (in Chinese)
- [16] 张健. 霍尔传感器的应用浅析[J]. 信息与电脑(理论版), 2009(7):138.
- [17] 孙文顺, 仇久安. 焊条在线计数装置研究[J]. 包装工程, 2015(17):144-146.
- [18] Robert Bosch GmbH Automotive After market (AACOM3). Bosch automotive electrics and automotive electronics: systems and components, networking and hybrid drive [M]. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [19] 刘栋铖. 工业检测中的线阵 CCD 相机系统设计与研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [20] 王大志. 精密机械运动学结构设计方法的若干新进展[D]. 北京:中国科学院, 2011.
- [21] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3):17-24.  
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):17-24. (in Chinese)