

农机卫星导航自动驾驶作业精度评估试验的研究

吉辉利 王熙*

(黑龙江八一农垦大学 工程学院,黑龙江 大庆 163319)

摘要 针对农机卫星导航自动驾驶作业精度没有统一和规范的评估指标及评估方法的问题,利用高精度 RTK-GPS 接收机,采用单点静态定位的测量方法,以农机卫星导航自动驾驶的起垄作业为测试对象,采集 4 块起垄作业地块的试验数据进行分析,并提出以垄向直线度和垄间平行度作为评估指标,对农机卫星导航自动驾驶作业精度的评估方法进行研究。结果表明:1)垄向直线度的最小值和最大值分别为 2.70 和 4.59 cm,最小和最大均方根分别为 3.36 和 5.55 cm;2)垄间平行度的最小值和最大值分别为 5.16 和 16.88 cm,最小和最大均方根 6.76 和 24.72 cm;3)根据垄向直线度和垄间平行度,农机卫星导航自动驾驶作业在 1 号地块的作业精度最高,3 号地块的作业精度最低,与实际作业情况相符。该评估方法可实现对农机卫星导航自动驾驶作业精度的量化评估,能为农机卫星导航自动驾驶作业精度的评估提供一种有效地测试及评估的方法。

关键词 农业机械; 卫星导航; 作业精度; 评估方法; 评估指标

中图分类号 S157.4

文章编号 1007-4333(2017)11-0148-09

文献标志码 A

Accuracy evaluation on the automatic driving operation of agricultural machinery based on satellite navigation

Ji Huili, WANG Xi*

(College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract Aiming at the problem that there is no uniform and standard evaluation index and evaluation method for the accuracy of automatic driving operation of agricultural machinery based on satellite navigation, by using a set of high precision RTK-GPS receiver, the measurement method of single point static positioning was adopted. The test object was the ridging operation of the automatic driving of agricultural machinery based on satellite navigation. Test data of 4 pieces of land ridging work were collected and analyzed. The ridge to linearity (RL) and the parallelism between the ridge (PBR) were used as the evaluation index. The evaluation method of the accuracy of the automatic driving operation of agricultural machinery satellite navigation was studied. The results showed that: 1) The minimum RL value was 2.70 cm, the maximum RL value is 4.59 cm, the minimum RMS value was 3.36 cm, and the maximum root mean square value was 5.55 cm; 2) The minimum PBR value was 5.16 cm, the maximum RL value was 16.88 cm, the minimum RMS value is 6.76 cm, and the maximum root mean square value is 24.72 cm; 3) According to RL and PBR, the highest accuracy of the automatic driving operation of the agricultural machinery satellite navigation was the No. 1 block, the lowest operating accuracy as No. 3 block. In conclusion, the evaluation method could be used to evaluate the accuracy of automatic driving operation of agricultural machinery satellite navigation.

Keywords agricultural machinery; satellite navigation; operation accuracy; evaluation method; evaluation index

近年来,随着我国北斗卫星导航系统投入民用,国内出现了大批自主研发的农机卫星导航产品^[1]。由于卫星钟差精度的高低及其产品性能的差异和所

采用的差分技术的不同,使得各自产品在农机导航作业过程中的定位导航精度也参差不齐^[2-3]。为了检验其田间导航作业精度,需要对装有卫星导航的

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2016-Y32)

第一作者: 吉辉利, 硕士研究生, E-mail: 240516443@qq.com

通讯作者: 王熙, 教授, 主要从事精准农业技术装备研究, E-mail: ndwangxi@126.com

农机作业精度进行测试评估。

目前,国内外对农机卫星导航自动驾驶作业精度没有统一和规范的评估指标及评估方法。国外对农机卫星导航自动驾驶作业精度的研究主要集中在通过利用移栽和播种作业时的特点来进行测试和获取各试验观测值^[4-9],常用均值、标准差和均方根值等统计值作为评价指标^[10]。国内由于运用在农机卫星导航自动驾驶作业方面的卫星导航设备均来自于国外技术成熟的产品,因而在农机卫星导航自动驾驶作业精度方面的研究较少,主要集中在对卫星定位导航的精度分析^[11-16]。目前对农机卫星导航作业精度检测的主要手段是采用测绳标定的人工测量方法进行测量^[17],效率低且产生的随机误差大。

本研究拟对黑龙江垦区农机卫星导航自动驾驶田间作业的实际情况进行调研,利用高精度 RTK-GPS 接收机采用单点静态定位的测量方法,对农机卫星导航自动驾驶的起垄作业精度进行检测,以期实现对农机在卫星导航系统控制下的自动驾驶作业精度的测试与评估,检验其是否能满足农艺要求和符合农业机械田间作业质量标准,旨在为农机卫星导航自动驾驶作业精度的检测提供一种有效地测试及评估的方法。

1 试验条件及方法

1.1 试验条件

本试验在黑龙江省九三管理局荣军农场十五连队的作业地块进行。试验地块共 4 块,其中:1 号地块单幅垄长为 983 m,斜坡高为 8 m,测点间距为 50 m,起垄作业效果较佳;2 号地块单幅垄长为 866 m,斜坡高为 10 m,测点间距为 50 m,起垄作业效果正常;3 号地块单幅垄长为 1 231 m,斜坡高为 14 m,测点间距为 100 m,起垄作业效果较差;4 号地块单幅垄长为 1 809 m,斜坡高为 9 m,测点间距为 100 m,起垄作业效果正常。试验前,4 块地块均已由该农场通过使用安装美国天宝卫星导航自动驾驶系统的农业机械完成了田间起垄施肥作业,根据美国天宝卫星自动导航系统所公布的数据,其卫星定位与自动驾驶千米直线误差为 ± 2.5 cm,垄间结合线精度为 ± 3.8 cm,所使用的农机具规格是单垄的起垄间距为 1.1 m,作业 1 幅为 6 个垄,一个作业幅宽为 6.6 m。

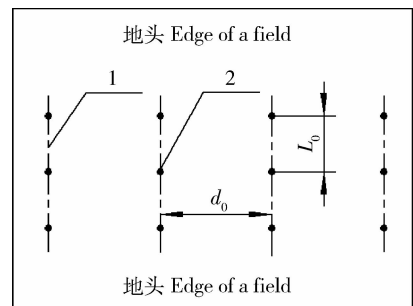
试验设备主要有:诺瓦泰 NovAtel RTK-GPS 接收机基准站;诺瓦泰 NovAtel RTK-GPS 接收机

移动站;GPS 手持机;PDL 接收数传电台;PDL 发送数传电台;三脚支架、100 m 测绳、50 m 钢卷尺和标记签若干。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

根据起垄作业时使用的农机具的实际作业幅宽,将 1 趟作业幅宽(即 6 幅垄)作为 1 组测试对象,将各组的测量点均设在该组的中心垄沟上。测试地段选在试验地块的地中段,距地块地头约 50 m。根据地块的实际垄长,沿垄向在每组测量的中心垄沟上,每相隔 50 或 100 m 的地方设定 1 个测量点并用标记签作上标记,每组的测量点共设 11 个,被测量垄长即为 500 或 1 000 m。在垂直于垄向的方向上,使得各组对应的测量点均垂直于垄向且在一条直线上。测量点设定后,在地块中地势较高、视野开阔的区域架设好 RTK-GPS 接收机的基准站,同时将 RTK-GPS 接收机的移动站连接好,等 RTK 差分信号接收稳定后,再按组进行逐点测量,每个测量点记录 10 个数据,并将测量数据通过 GPS 手持机记录下来。农机卫星导航自动驾驶起垄作业的测试方法示意(图 1)。



1. 中心垄沟;2. 测量点。

1. The center of furrow;2. Measuring point.

d_0 为实际作业幅宽,m; L_0 为测量点间距,m。

d_0 is the actual working width,m; L_0 is the measuring point spacing,m.

图 1 农机卫星导航自动驾驶起垄作业的测试方法示意

Fig.1 The test method of the automatic driving ridging operation of agricultural machinery based on satellite navigation

1.2.2 测量仪器的精度

本研究中需要利用一套高精度的 RTK-GPS 接收机进行单点静态定位测量,接收机本身的点定位精度直接决定所取得的试验结果的准确性和可靠性。为了检验试验中使用的 RTK-GPS 接收机的点

定位精度是否满足试验测量的需求,根据农机卫星导航自动驾驶作业精度测试方案的设计,在黑龙江八一农垦大学的校园里进行了诺瓦泰 NovAtel RTK-GPS 接收机的点定位精度测试试验。测试条件为静态,差分距离为 1 km。试验结果表明,诺瓦泰 NovAtel RTK-GPS 接收机的静态点定位精度的定位圆概率误差 CEP 值为 0.3~0.4 cm,点定位精度值均在 2 cm 以下,说明其点定位精度较高,性能可靠,能满足本研究试验测量要求。

1.3 评估指标

国外常用平均值、标准差、均方根值(RMS)和极值等评价指标进行描述统计。目前,国内也有很多指标用于对农业机械田间作业质量的评价,如地面平整度、垄距误差、重播与漏播率、收割损失率、脱粒损失率等。本研究在进行农机卫星导航自动驾驶作业精度评估时,根据起垄作业的特点和作业质量的要求,采用垄向直线度和垄间平行度 2 个指标来表征。

1.3.1 垄向直线度

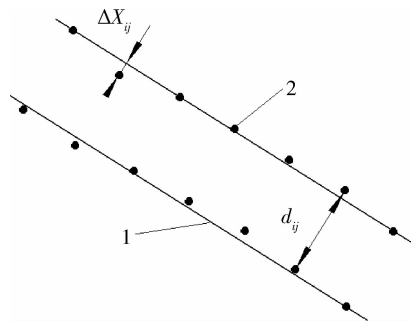
垄向直线度表征农机卫星导航自动驾驶作业直线行驶程度,根据农机卫星导航自动驾驶作业直线行驶的特点,用地块内所有测量点分别与各组线性拟合直线的偏差绝对值的平均值表示。垄向直线度值反映了农机卫星导航自动驾驶直线跟踪作业的总体精度,垄向直线度值越小,说明农机导航田间作业直线行驶的精度越高,作业时重、漏率将会越低;反之,则说明农机导航田间作业直线行驶的精度越低,作业时重、漏率会越高。

在农机卫星导航自动驾驶作业时,直线行驶的实际作业轨迹不可能呈一条直线,但它在作业时是以一条基准线作为跟踪线,根据卫星导航实时提供的田间位置信息不断修正农业机械前进的方向。根据这一特性,对每组测量点进行线性拟合直线的求解,用来代替农机卫星导航自动驾驶作业时的基准跟踪线,计算得出各测量点到线性拟合直线的偏移量即可求得垄向直线度(图 2)。

假设每组测量点的拟合直线方程为 $Y = A + BX$,则测量点到拟合直线的偏差计算公式为:

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

式中: ΔX_{ij} 为第 i 组垄的第 j 个测量点与拟合直线的偏移量, m ; X_{ij} 、 Y_{ij} 为第 i 幅垄的第 j 个测量点的 X 、 Y 坐标值;当 $BX_{ij} - Y_{ij} + A = 0$ 时,测量点则在



1. 线性回归拟合基准线;2. 测量点。

1. The linear regression fitting datum line; 2. Measuring point.

d_{ij} 为实际测量幅宽, m ; ΔX_{ij} 为偏差, cm 。

d_{ij} is the actual width measurement, m ; ΔX_{ij} is deviation, cm .

图 2 垄向直线度的计算方法示意

Fig. 2 The calculation method of ridge to linearity

垄向拟合直线上,为理想作业效果;当 $BX_{ij} - Y_{ij} + A > 0$ 或 < 0 时,测量点在垄向拟合直线的右侧或左侧。

对所有求得的 ΔX_{ij} 进行算术平均值计算可得出垄向直线度(RL),其表达式为:

$$RL = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} |\Delta X_{ij}| \right] \quad (2)$$

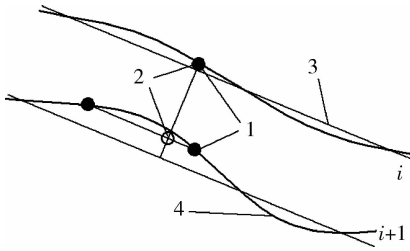
式中: N 为测量组数; n_i 为第 i 组的测量点数。RL 值越小,说明农机卫星导航自动驾驶作业时的直线行走精度越高,作业效果越佳,作业的重、漏率也会越低。而 $RL = 0$ 是理论上能达到的自动驾驶直线行走的最佳作业状态,较大的 RL 值则表示农机卫星导航自动驾驶直线行走作业能力较差。

1.3.2 垄间平行度

垄间平行度是用来表征农机卫星导航自动驾驶作业结合线精度的指标。用地块内相邻两组对应测量点的间距与实际作业幅宽的差值绝对值的平均值表示。垄间平行度值越小,说明两组垄间的结合线精度越高,地块的土地利用率越高;反之,表明两组垄间的结合线精度越低,地块的土地利用率越低,这样的情况在实际生产作业中要避免。

根据农机卫星导航自动驾驶田间作业往复式行走的特征,其田间行走的每幅垄的实际作业轨迹是一条无法求解的曲线,需要求解的相邻垄间距离实际为垂直于垄向的两相邻垄间对应点的距离。在田间测试试验时,因为两相邻垄间的对应点是由人为的在视觉上保持垂直于垄向的方向,故而直接进行两相邻垄间对应点的距离计算所得出的结果是不准确的。为了求得垂直于垄向方向上两相邻垄间理论

对应测量点的间距,在本研究中利用微分的方法,将这条曲线分割成若干段,并将每段曲线视为一条线段,用来简化计算,求得垄间平行度(图 3)。



1. 实测对应点;2. 理论对应点;

3. 线性回归拟合基准线;4. 实际作业轨迹。

1. Measured correspondence point;2. Theoretical correspondence point;

3. The linear regression fitting datum line;

4. Actual operating track.

● 实际测量点;○ 理论对应测量点。

Solid dot is actual measurement point;

Hollow dot is corresponding measuring point theory.

图 3 垄间平行度计算方法示意图

Fig. 3 The calculation method of parallelism between the ridge

两组相邻垄间的对应测量点的间距计算公式为:

$$d_{i,j} = \sqrt{(X - X_{i,j})^2 + (Y - Y_{i,j})^2} \quad (3)$$

式中: $d_{i,j}$ 为第 i 和 $(i+1)$ 组两相邻第 j 个理论对应点间的距离, m 。通过计算 $d_{i,j}$ 与标准垄幅宽 d_0 间

差值的算术平均值即可得出垄间平行度(PBR),其表达式如下:

$$PBR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} |d_{i,j} - d_0| \right] \quad (4)$$

式中: N 为测量组数; n_i 为第 i 和 $(i+1)$ 组两相邻理论对应点数; d_0 为实际作业幅宽, m ;当 $d_{i,j} - d_0 > 0$ 时,两相邻理论对应点距离大于标准垄幅宽,即实际作业为漏耕; $d_{i,j} - d_0 < 0$ 时,两相邻理论对应点距离小于标准垄幅宽,实际作业为重耕; $d_{i,j} - d_0 = 0$ 时,为农机卫星导航自动驾驶作业的理想作业效果。

PBR 值越小,说明农机卫星导航自动驾驶作业时的结合线精度越高,土地利用率也越高,作业效果越佳。而 $PBR=0$ 是理论上能达到的自动驾驶最佳作业状态下的垄间结合线精度,较大的 PBR 值则表示农机卫星导航自动驾驶作业垄间结合线精度差,土地利用率低,这种情况在实际生产作业中要避免。

2 测试结果分析

2.1 测量点轨迹分析

为了对采集的测量点进行初步的判定,以便在之后的试验数据预处理和评估时用作参考,利用 MATLAB 软件建立了各测试地块的测量点轨迹图(图 4)。从测试地块的测量点轨迹图中可见,各试

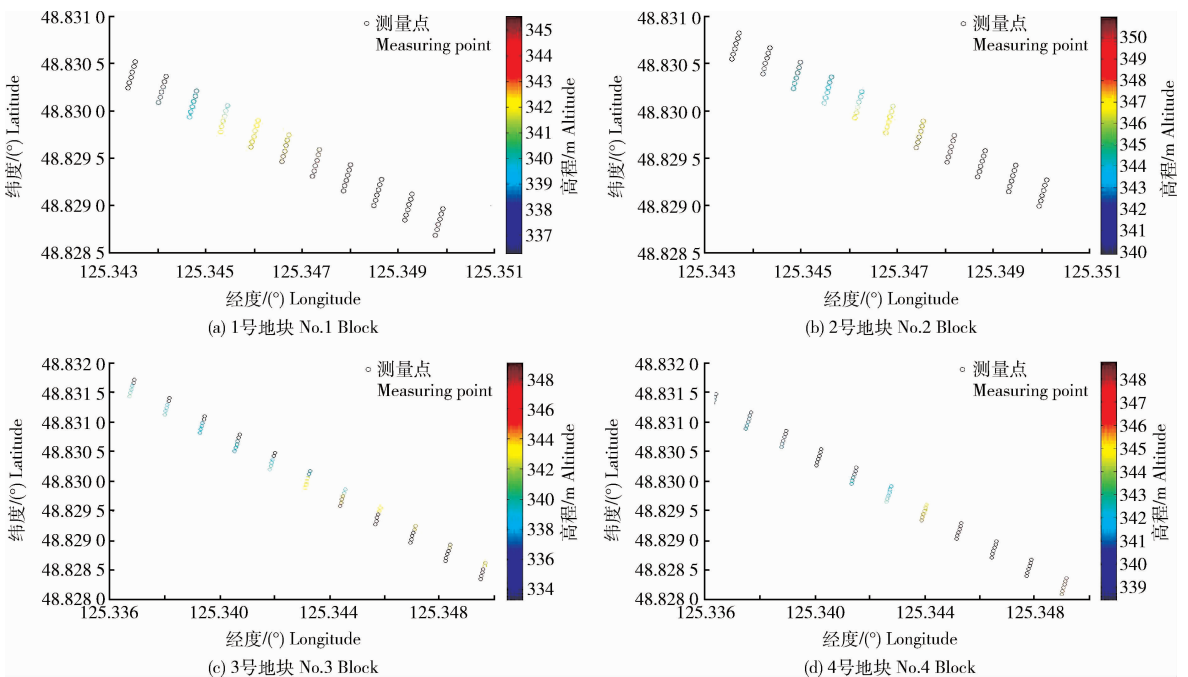


图 4 农机卫星导航自动驾驶起垄作业测试地块的测量轨迹

Fig. 4 The measurement locus of test plots of the automatic driving ridging operation of agricultural machinery based on satellite navigation

验地块中,垄向上各组的测量点均呈线性关系,并基本保持平行。

2.2 评估指标分析

因为本研究中采用 RTK-GPS 接收机采集试验数据,所以需要先利用高斯投影坐标转换的方法将试验数据从大地坐标转换为平面直角坐标后,才能对测试试验数据进行分析处理和评估。

2.2.1 垄向直线度结果分析

转换为平面直角坐标后,首先分别将各组测量点利用最小二乘原理进行线性拟合,求得该组的拟合基准直线方程,然后利用式(1)求出该组各测量点与基准直线的垄向偏差,最后利用式(2)求出该地块的垄向直线度,同时采用均值和均方根值(RMS)进行比较分析,计算结果见表1。

表1 农机卫星导航自动驾驶起垄作业的评估指标
Table 1 Evaluation index of the automatic driving ridging operation of agricultural machinery based on satellite navigation cm

评估指标 Evaluation index	1号地块 No. 1 Block	2号地块 No. 2 Block	3号地块 No. 3 Block	4号地块 No. 4 Block
垄向直线度 RL	2.70	3.24	4.59	3.78
标准差 SD	2.02	2.49	3.16	2.66
均值/ 10^{-8}	-1.51	4.77	-1.34	-1.58
均方根值 RMS	3.36	4.08	5.55	4.26
均方根误差 RMSE	2.13	2.63	3.3	2.77

可见,标准差值和均方根误差值均较大,说明垄向偏差值的离散程度较大;均值无法反映出农机卫星导航自动驾驶作业的直线行驶精度,这是由于求得的垄向偏差值均匀地分布在拟合基准线的两侧;均方根值均大于相应地块的垄向直线度值,这是因为均方根值对极值的敏感程度大于垄向直线度。导致垄向直线度值大于美国天宝卫星自动导航系统所公布的数值的原因是,计算垄向直线度时的数据为农机卫星导航自动驾驶作业后的作业精度,而美国天宝所用的数据为卫星导航本身的数据。

为直观反映出各测试地块的直线行驶的整体作业情况,分别将各测试地块的垄向偏差值进行统计分析结果见图5。可知,各地块的垄向偏差值主要集中在 ± 4 cm之间,其中1号地块的垄向偏差较为集中,作业效果较为理想;2号地块次之;3号地块的垄向偏差值最为分散。结合4块测试地块的垄向直线度值,可以初步判定农机卫星导航自动驾驶作业在1号地块的直线行驶精度最高,2号地块次之,3号地块最低。

2.2.2 垄间平行度结果分析

由于被测垄间的对应测量点是由人工在视觉上使其与垄向相垂直且保持在一条直线上,因而存在

的随机误差较大,在计算垄间平行度前,需要先求得各测量点的理论对应点坐标。为了检验所求得理论对应点坐标是否优于实测对应点且跟前一组测量点是否在一条直线上,利用求得相邻组的实测对应点与理论对应点的间距值进行对比,计算结果见表2。可知,测量点间的误差间距是通过第二组测量点间距和理论对应测量点间距分别与第一组测量点间距的作差获得,从各自的误差间距可以说明理论对应点误差间距要远小于实测对应点误差间距。这也表明,求得的理论对应点基本是与它的对应测量点在垂直于垄向的直线上,这也大大地提高了垄间平行度评估结果的准确性和真实性。

在求得各测量点的理论对应测量点的坐标后,即可根据式(3)求得各组间的测量点间距,然后根据式(4)就能得出各地块的垄间平行度,同样采用均值和均方根值(RMS)进行比较分析,计算结果见表3。可知,标准差值和均方根误差值均较大,从而说明垄距偏差值离散程度较大;均值大部分为负值,说明农机卫星导航自动驾驶作业时大部分情况为重耕;从均方根值和垄间平行度值来看,除了3号地块的数值较大之外,其他地块的数值均相差不大,说明3号地块的垄间结合线精度最差。

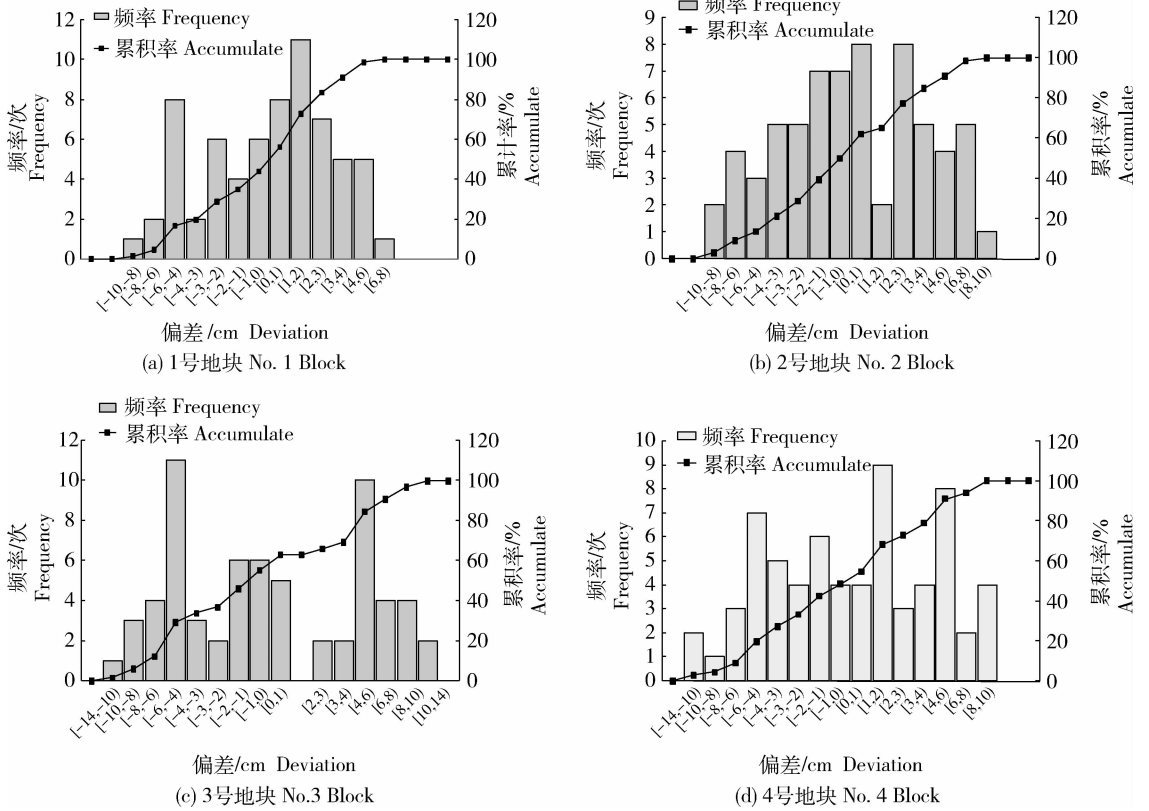


图 5 测试地块的垄向偏差统计

Fig. 5 The test plots of ridge direction deviation

表 2 1号地块测点间距的计算结果

Table 2 The calculation example of the first set of measuring points for No. 1 Block

m

序号 Sequence number	第一组测点间距 Distance between first set of measurement points	第二组测点间距 Distance between second set of measurement points	理论对应点间距 Theoretical correspondence points	实测对应点 误差间距 Distance error between measured points	理论对应点误差间距 Distance error between theoretical correspondence points
A01	49.984 42	50.436 89	49.984 40	0.45	-1.90×10^{-5}
A02	49.955 77	49.548 13	49.955 77	-0.41	6.14×10^{-7}
A03	50.009 66	50.020 88	50.009 65	1.12×10^{-2}	-3.40×10^{-6}
A04	49.986 88	49.922 15	49.987 02	-6.47×10^{-2}	1.37×10^{-4}
A05	49.960 46	50.044 91	49.960 49	8.44×10^{-2}	2.69×10^{-5}
A06	49.978 69	49.960 10	49.978 70	-1.86×10^{-2}	1.01×10^{-5}
A07	49.980 53	49.983 74	49.980 48	3.21×10^{-3}	-5.30×10^{-5}
A08	49.991 46	49.958 22	49.991 37	-3.32×10^{-2}	-9.30×10^{-5}
A09	50.012 99	50.047 69	50.013 01	3.47×10^{-2}	2.40×10^{-5}
A10	49.955 21	49.926 28		-2.89×10^{-2}	

表3 农机卫星导航自动驾驶起垄作业的评估指标

Table 3 Evaluation index of the automatic driving ridging operation of agricultural machinery based on satellite navigation

评估指标 Evaluation index	1号地块 No. 1 Block	2号地块 No. 1 Block	3号地块 No. 1 Block	4号地块 No. 1 Block
垄间平行度 PBR	5.16	7.84	16.88	5.61
标准差 SD	4.42	5.22	18.25	5.46
均值 M	-2.34	-2.95	13.76	-2.22
均方根值 RMS	6.76	9.39	24.72	7.79
均方根误差 RMSE	4.66	5.40	19.69	5.83

由于农机卫星导航自动驾驶田间作业是根据接收到的实时差分卫星定位信号行进,因而行驶时随机性较大,作业环境又较为复杂,这样不但造成地块与地块间的作业效果具有一定的差异性,就连同一个地块中垄与垄间的作业效果也不尽相同。为了更

好的了解垄间平行度是否对农机卫星导航自动驾驶作业的垄间结合线精度具有一定的代表性,对各试验地块的垄距偏差进行分区段的统计分析,便于更好的分析各地块的垄距偏差的分布趋势(图6)。可见各试验地块垄距偏差的分布区间以及垄距偏差的

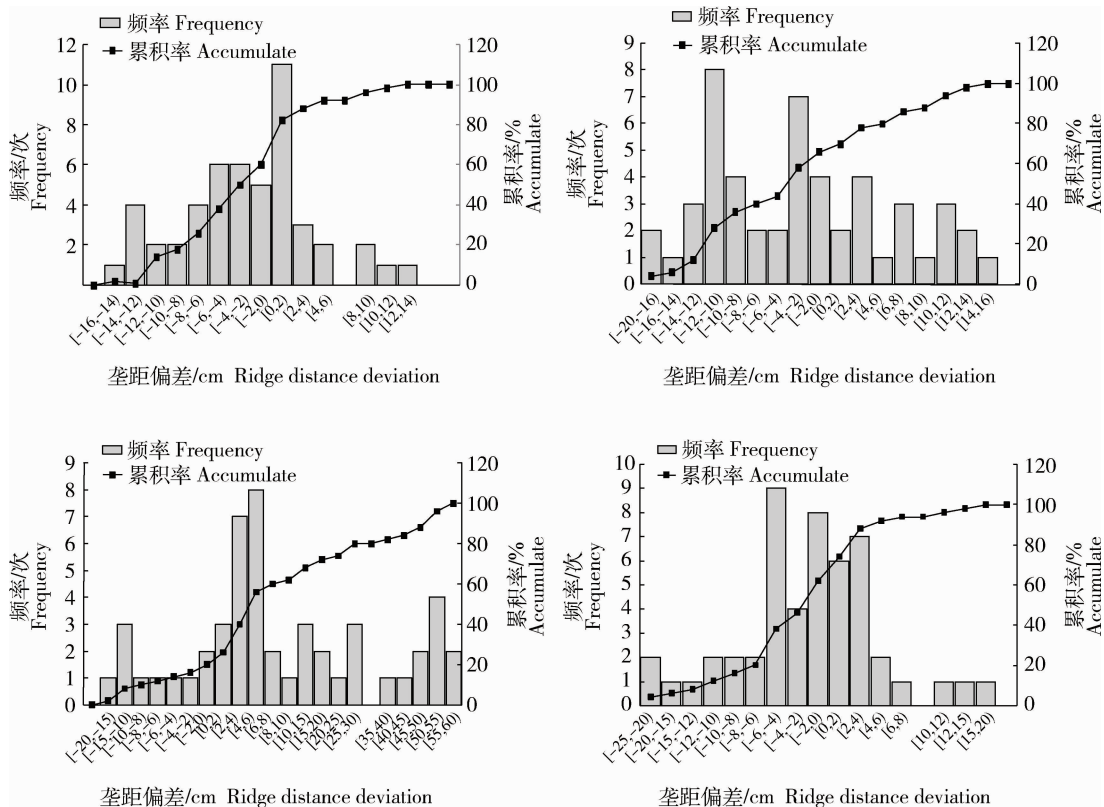


图6 测试地块的垄距偏差统计

Fig. 6 The test plots of ridge distance deviation

集中趋势,其垄距偏差值主要集中在 $-2\sim-8$ cm 和 $2\sim8$ cm。其中,1 号和 4 号地块的垄距偏差值分布较为集中,说明这两个地块的垄间结合线精度相对较高;而 3 号地块垄距偏差最大值 >55 cm,说明该地块的垄间结合线精度极差,这是不符合农机作业要求的。由于垄距偏差的负值反映的是田间起垄作业时的重耕情况,正值反映的是田间起垄作业时的漏耕情况。可见,美国天宝卫星自动导航系统的田间作业重耕率要大于漏耕率。

2.3 评估结果分析

在 4 个试验地块中,垄向直线度的最小值和最大值分别为 2.70 和 4.59 cm,最小和最大均方根分别为 3.36 和 5.55 cm;垄间平行度的最小值和最大值分别为 5.16 和 16.88 cm,最小和最大均方根 6.76 和 24.72 cm。根据垄向直线度和垄间平行度可以得出,农机卫星导航自动驾驶作业在 1 号地块的作业精度最高,3 号地块的作业精度最低,出现这种情况的原因是由 3 号地块的第二幅垄和第四幅垄的垄距偏差较大造成的,而导致出现这种情况的主要原因是 3 号地块作业时的地面斜度较大,导致轮胎发生侧移造成,本研究的测试结果与实际作业情况相符。

3 结 论

本研究对农机卫星导航自动驾驶的起垄作业效果进行测试和评估,得到如下结论:

1) 基于垄向偏差和垄距偏差的分析,提出垄向直线度和垄间平行度为 2 个量化评估指标,可以对农机卫星导航自动驾驶作业的直线行驶精度和垄间结合线精度进行定量描述。

2) 利用对起垄作业效果的测试,可以实现对卫星导航控制系统下的农机自动驾驶作业精度的试验数据采集。采用垄向直线度和垄间平行度 2 个评估指标表征评估结果,并且分别统计 2 个评估指标的偏差分布列,可以较清晰的反映出一个作业地块作业质量的分布情况,如重、漏耕。

3) 基于本研究的测试及评估方法,可以实现对农机卫星导航自动驾驶作业精度的量化评估。

参考文献 References

[1] 蒋天小,赵金峰,郭瑞宇,史照平.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 T X,Zhao J F,Guo R Y,Shi Z P. Application of BeiDou navigation system in precision agriculture system[J]. *Digital Communication World*, 2016,3(2):9-12 (in Chinese)

[2] 刘婧. GNSS 接收机设备测试与评估方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013

Liu J. Research on testing and evaluating method of GNSS receiver[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013 (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 C Y,Zhou J. 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] Han S F, Zhang Q, Noh H, Shin B. A dynamic performance evaluation method for DGPS receivers under linear parallel-tracking applications[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2004,47(1):321-329

[5] Yao L, Li L, Zhang M, Li M Z. Automatic guidance of agricultural vehicles based on global positioning system[J]. *Artificial Intelligence Applications and Innovations*, 2005, 617-624

[6] Macák M, Žitňák M, Nozdrovický L. Using satellite navigation for seeding of wide-row and narrow-row crops[J]. *Research Agricultural Engineering*, 2011,57:7-13

[7] Perez-Ruiz M, Carballido J, Aguera J, Gil J A. Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles[J]. *Precision Agricultural*, 2011(12):639-652

[8] Pérez-Ruiz M, Slaughter, D C. Automatic GPS based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012,80:41-49

[9] Magar A P, Singh M, Mahal J S, Mishra P K, Kumar R, Sharma A. Efficient tractor operation through satellite navigator[J]. *Scientific Research And Essays*, 2014(17):768-777

[10] 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

[11] 李涛,孔祥斌,梁颖,秦静. 基于农户决策行为的耕地质量评价理论与方法构建[J]. 中国农业大学学报, 2010,15(3):101-107

Li T, Kong X B, Ling Y, Qin J. Found the research frame on the arable land evaluation based on household decision behavior [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010,15(3):101-107 (in Chinese)

[12] 刘春红,张漫,张帆,刘刚. 基于无线传感器网络的智慧农业信息平台开发[J]. 中国农业大学学报, 2011,16(5):151-156

- Liu C H, Zhang M, Zhang F, Liu G. Development of agricultural information processing platform based on wireless sensor networks [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 151-156 (in Chinese)
- [13] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012
- Li Z H. Research on monitoring and assessment of satellite navigation system performance [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2012 (in Chinese)
- [14] 陈坡, 孙付平, 韩雪峰, 周本才. 北斗卫星导航系统定位精度分析[J]. 海洋测绘, 2013, 33(5): 34-37
- Chen P, Sun F P, Han X F, Zhou B C. Analysis on positioning accuracy of Beidou satellite navigation system [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(5): 34-37 (in Chinese)
- [13] 陈兵, 申俊飞, 何海波, 王爱兵. 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 B, Shen J F, He H B, Wang A B. The analysis and evaluation of BDS positioning accuracy [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2015, 3(1): 1-9 (in Chinese)
- [15] 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 J, Zhang P, Song B H. 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)
- [16] 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 H, Meng Z J, Fu W Q. Overlap and skip evaluation for agricultural machinery operation based on GPS track logs[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 149-154 (in Chinese)
- [17] 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
- DB23/T 207. 8—2002 Method of quality check and acceptance for farm machinery performance [S]. Heilongjiang: Heilongjiang Bureau of Quality and Technical Supervision, 2002 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春