

# 北斗定位田间信息采集平台运动控制器设计与试验

丁幼春, 詹 鹏, 周雅文, 杨军强, 张闻宇, 朱 凯

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

**摘 要:** 针对轮式田间信息采集平台在田间复杂环境下定速直线跟踪问题, 设计了一种横向纠偏与纵向定速行走的运动控制器。控制系统采用低精度北斗定位模块、电子罗盘、旋转编码器、角度传感器获取田间信息采集平台的状态信息(包括位置、航向、速度、转向角)作为运动控制器的输入, 通过构建的横向纠偏模糊控制器和纵向定速 PID (proportion integration differentiation) 控制器, 实现行走过程中的横向纠偏和纵向定速行走。为获取更准确的位置信息, 采用 3 个低精度北斗定位模块以边长 1 m 的等边三角形方式放置对数据求均值得到中心点定位数据的方法, 将北斗接收模块的平均静态定位精度从 2.06 m 提高到了 1.50 m, 动态定位精度提高到 0.78 m 以内。信息采集平台田间试验结果表明: 车体系统能按照规划的路径行走, 在设定速度 0.4 m/s 时, 纵向速度稳态误差小于 7%, 在外界扰动下响应调节时间小于 3 s; 以相同的速度行驶, 初始横向偏距分别为 1.4、2.0 和 2.5 m 时, 稳定跟踪需要的时间分别为 11、15 和 25 s 且稳定跟踪后最大横向偏距在 0.31 m 以内, 满足农业田间信息采集的需要。该控制系统实现了信息采集平台在田间的定速直线跟踪和稳定行走, 为其高效智能化作业提供了技术参考。

**关键词:** 农业机械; 控制系统; 导航; 田间信息采集平台; 运动控制器; 定位精度; 直线跟踪

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.023

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0178-08

丁幼春, 詹 鹏, 周雅文, 杨军强, 张闻宇, 朱 凯. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.023 http://www.tcsae.org

Ding Youchun, Zhan Peng, Zhou Yawen, Yang Junqiang, Zhang Wenyu, Zhu Kai. Design and experiment of motion controller for information collection platform in field with Beidou positioning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 178—185. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.023 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

随着精准农业技术的不断发展, 农业机器人的研究和应用越来越受到世界各国的重视, 也取得丰硕的成果<sup>[1-2]</sup>。中国在自主导航农业机器人的研究方面虽起步较晚, 但近年来发展十分的迅速, 被广泛用于自动喷洒农药、收割作业、中耕除草、插栽作业以及农田生物和环境信息采集等方面<sup>[3-11]</sup>。在现代农业中为了实时监测农作物生长状态和环境的变化以便能够做出适时的人工调控, 田间信息采集平台机器人被应用于田间的信息采集代替了传统用人工观测和手动记录的方法<sup>[12-15]</sup>。而田间的作业环境非常复杂, 为了更好地采集田间的信息, 对平台载体在田间自主控制有较高的要求, 诸如速度的恒定、路径规划与跟踪<sup>[16-20]</sup>, 国内外众多学者对此进行了研究。

国外, Bak 等<sup>[21]</sup>开发了杂草检测机器人平台, 以 PC 机为主控制器, 通过 RS232 串口接收来自 RTK-DGPS (real time kinematics differential GPS)、航向陀螺仪、地磁

罗盘的状态信息, 通过 CAN-Bus 控制电机从而控制机器人四个轮子的转动, 试验结果表明横向跟踪精度在厘米级。Bakker 等<sup>[22]</sup>开发了自动除草农用机器人, 在每个轮子上嵌有测量转速和角度的传感器得到角度和速度信息作为控制器的输入信息, 平台装有 2 个 GPS 接收机用于计算位置和航向信息, 试验表明当机器人以 0.3 m/s 的速度行驶时直线跟踪的最大横向偏差为 3.4 cm。Juman 等<sup>[23]</sup>开发了一种用于检测油棕种植园中树干的自主导航机器人, 搭载了 Microsoft XBOX KINECT、超声波和 GPS 等传感器, 能够在自主导航避障的同时采集林间树干的图像和深度信息数据, 试验表明该机器人能够自主辨别树干且检出率高达 97.8%。国内, 顾宝兴等<sup>[24]</sup>研制了一种履带式农用智能移动平台, 该平台利用双目摄像机和 GPS 进行组合导航, 实现了移动平台在田间对直线和曲线路径的跟踪。张美娜等<sup>[25]</sup>利用 RTK-DGPS 系统、惯性传感器、多种编码器来获得定位信息、姿态信息、转向轮偏角和车辆的行驶速度, 并通过建立车辆运动学模型和转向模型基于 PID 理论设计了航向和横向控制器, 试验结果表明该控制器在初始偏差为 0.7 和 1.2 m 时横向偏差的最大值分别为 2.6 和 1.7 cm<sup>[26-27]</sup>。以上智能化移动平台或农业车辆自主行走时虽跟踪精度满足要求, 但一般采用的是高精度的 RTK-DGPS 系统, 成本比较昂贵。

本文针对信息采集平台实现定速直线跟踪的问题, 在满足跟踪精度条件下力求成本低廉, 在自主设计的田

收稿日期: 2017-01-15 修订日期: 2017-05-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD020060602); 湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)

作者简介: 丁幼春, 男, 湖北孝感人, 副教授, 主要从事油菜机械化生产智能化技术与装备研究。武汉 华中农业大学工学院, 430070。

Email: kingbug163@163.com

间信息采集平台上，利用 3 个低精度北斗定位模块消除随机定位误差，提高定位精度，融合电子罗盘的方向信息，设计了横向纠偏模糊控制器和纵向定速 PID 控制器，以期实现信息采集平台田间行驶的纠偏和定速控制，降低运动控制成本，提高信息采集平台的智能化水平，为其自主采集田间信息提供了技术支持。

### 1 田间信息采集平台系统组成

#### 1.1 平台总体结构布局

本文中田间信息采集平台主要由 3 个部分组成，分别为车体系统、液压驱动系统、速度控制系统。采集平台质量为 300 kg，载质量 100 kg，作业行走最高速度 1.0 m/s，如图 1 所示。



1. 液压马达 2. 后桥摇摆轴结构 3. 汽油发动机 4. 双联液压泵 5. 步进电机/液压转向器 6. 电液比例阀 7. 立轴结构 8. 液压缸  
1. Hydraulic motor 2. Rocking shaft structure on rear axle 3. Gas engine 4. Duplex fluid pump 5. Stepping motor/hydraulic steering gear 6. Electro-hydraulic proportional valve 7. Vertical structure 8. Hydraulic cylinder

图 1 田间信息采集平台主要组成  
Fig.1 Main composition of information collection platform in field

车体系统采用后桥摇摆轴结构，确保在高低不平的田块中行走的平稳性，同时增加立轴高度来提升离地间隙，减少对作物的弯折影响。

液压驱动系统是由汽油发动机驱动定量双联液压泵为前进和转向提供液压动力。利用电液比例阀调节进入马达的流量实现行进速度调节，同时利用步进电机带动液压转向器驱动液压缸移动实现转向调节。

运动控制系统是由 STM32F4 主控制器通过传感器采集车体本身的状态信息，作为运动控制器的输入，经过计算后输出电压信号和脉冲频率信号，以此控制电液比例阀的阀口开度和步进电机转速，达到控制车体的行进速度和航向。

该采集平台能够很好地应用于田块信息如边界信息、面积、形状、厢距、开沟、土壤质地等以及作物信息如植株尺寸、密度、均匀性、长势的快速获取并储存，供后期分析、决策提供最原始有效的数据。此外预留有液压输出接口，可为其他播种、施肥装置田间试验提供动力与条件。

#### 1.2 控制系统结构组成

控制系统硬件结构框图如图 2 所示。

平台控制系统的结构主要由传感器、信号调理电路和驱动器、主控制器 3 部分组成。

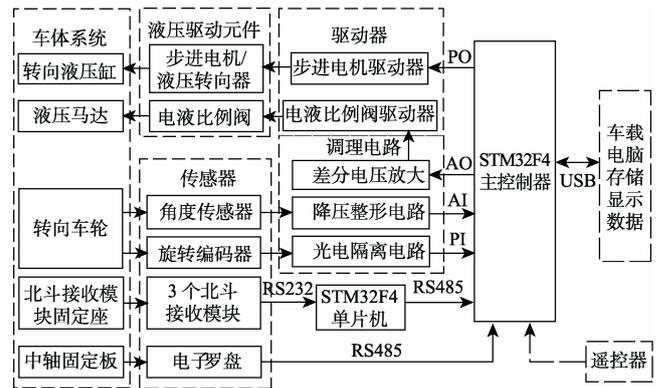


图 2 控制系统结构框图  
Fig.2 Structure diagram of control system

传感器包括低成本的 3 个北斗接收模块 (SM1612-MTBD 定位精度为 2.0 m，市场价格¥90)、电子罗盘 (DCM260B-485 型)、角度传感器 (DWQT-V10-70-Φ38-II-G 型) 和旋转编码器 (HES-1024-2MHT 型)，依次用于测量车辆的定位信息、航向信息、转向轮的转角以及车辆行驶的速度。其中 STM32F4 单片机将 3 个北斗模块的定位信息经过处理后通过串口通信传给 STM32F4 主控制器。

信号调理电路主要是将信号放大、光电隔离、降压整形符合接口规范。驱动器包括电液比例阀驱动器和步进电机驱动器，通过接收电压信号和脉冲频率信号，以此控制电液比例阀的阀口开度和步进电机转速，达到控制车体的行进速度和航向。

STM32F4 主控制器通过传感器获得位置、航向、速度、转向角信号作为横向纠偏模糊控制器和纵向定速 PID 控制器的输入，通过设计的运动控制算法，输出的控制量包括电压和脉冲频率控制信号，以此实现车体速度和航向的控制。为了调试方便，主控制器还承担来自人的无线遥控指令、参数接收任务，并输出相应的控制指令。

### 2 运动控制器的设计

为了实现田间信息采集平台的定速直线行走，设计了横向纠偏模糊控制器和纵向定速 PID 控制器。前者是将田间信息采集平台的位姿信息与期望的路径进行比较获得误差，通过模糊控制器给出正确的决策，控制执行机构使车辆跟踪目标直线，后者通过 PID 控制器输出控制电压使得车体保持恒定的速度行驶，如图 3 所示。

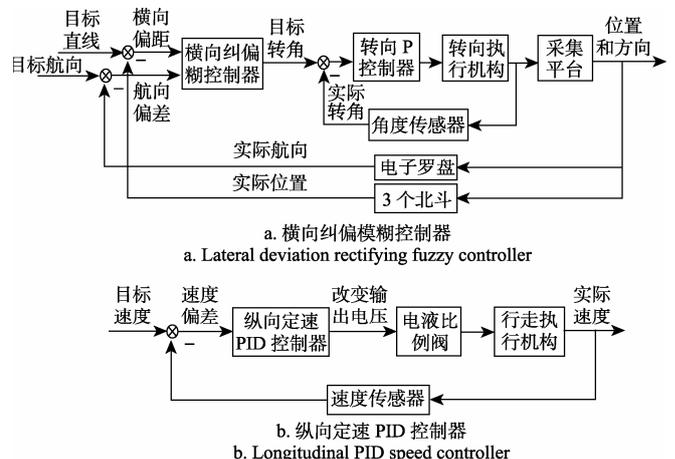


图 3 运动控制器框图  
Fig.3 Diagram of motion controller

横向纠偏模糊控制器采用双闭环控制结构，外闭环由航向角和 3 个北斗的定位信息检测构成反馈，内闭环以前轮转角信息作为单位负反馈。运动控制器的控制周期  $T$  与车体的行走速度和电控液压转向系统有关，总体上当纵向目标速度越大时，控制频率要求越高，控制周期  $T$  越小，但控制周期  $T$  也受到液压驱动特性的影响， $T$  过小会导致液压驱动性能急剧下降。通过液压转向轮的测试得知在转向  $4^\circ$  时，需要 0.15 s。综合行进速度的范围与转向特性要求，设定控制周期  $T$  为 0.5 s。

### 2.1 横向偏距和航向偏差

直线导航匀速行走时，导航前需要确定一条目标导航线，称为  $AB$  导航线。北斗经纬度坐标经过坐标系转换为平面直角坐标，起点为  $A(x_1, y_1)$ ，终点坐标为  $B(x_2, y_2)$ 。那么  $AB$  的直线方程为

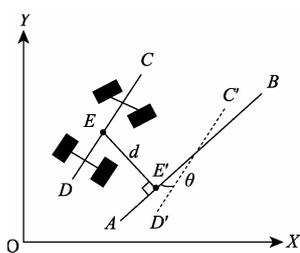
$$ax + by + c = 0 \tag{1}$$

式中  $a=y_2-y_1$ ;  $b=x_1-x_2$ ;  $c=x_2y_1-x_1y_2$ 。

液压采集平台当前点的坐标为北斗合成点  $E(x_3, y_3)$ ，当前点到目标直线的距离  $d$  为

$$d = \frac{ax_3 + by_3 + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \tag{2}$$

如图 4 所示，直线  $AB$  为目标直线，直线  $CD$  为电子罗盘测得的当前航向，点  $E$  是北斗定位合成点  $E$  作垂线与直线  $AB$  的交点， $EE'$  两点之间的距离  $d$  为液压采集平台到目标直线的横向偏距。直线  $C'D'$  为直线  $CD$  平移直线，直线  $C'D'$  与直线  $AB$  的夹角  $\theta$  为航向偏差，将这 2 个偏差值作为模糊控制器的输入，输出为转向轮期望的转角，在小闭环中期望转角减去角度传感器采集到的当前转向前轮角度，即是转向轮要转过的角度，同时在行走的过程中纵向 PID 速度控制器使车体保持匀速行走，最终完成目标直线的匀速直线行走。



注：A 为目标导航线的起点；B 为目标导航线的终点；C、D 为电子罗盘实时测得航向直线上的两点；C'、D' 为与直线 CD 平行直线上的两点；E 为采集平台当前位置的北斗定位合成点；E' 是合成点 E 作垂线与直线 AB 的交点；横向偏距  $d$  为采集平台当前点到目标直线的距离，m；航向偏差  $\theta$  为采集平台当前航向和目标导航线之间的夹角， $(^\circ)$ 。

Note: A is the starting point for the target navigation line; B is the destination of the target navigation line; C and D are real-time measuring two points by electronic compass on the line of heading; C' and D' are two points of a parallel line to the CD line; E is the Beidou positioning synthesis point of the current position of collection platform; E' is the intersection point of the resultant point E as the vertical line and the AB line; Lateral offset  $d$  is the distance from the current point of the acquisition platform to the target line, m; Course deviation  $\theta$  is the angle between the current course of the collection platform and the target navigation line,  $(^\circ)$ .

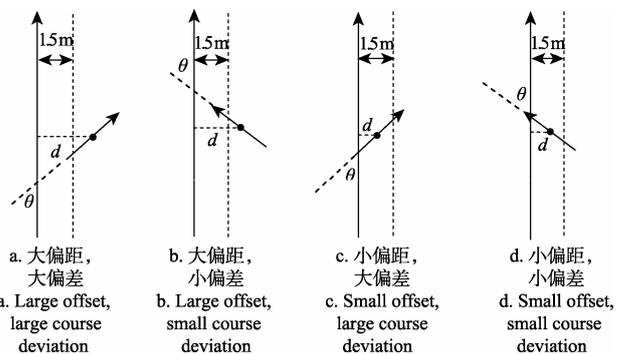
图 4 横向偏距与航向偏差示意图

Fig.4 Diagram of lateral offset and course deviation

### 2.2 横向纠偏模糊控制器设计

横向纠偏模糊控制器将航向偏差和横向偏距作为模糊控制器的输入，信息采集平台转向轮的转角作为输出量。根据数据融合后北斗接收模块的精度和横向偏距在行走过程的变化规律，横向偏距  $d(m)$  的论域范围为  $[-3, 3]$ ， $d$  模糊子集的论域为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，量化因子为  $K_1=6/3=2$ 。航向偏差  $\theta$  的论域范围为  $[-60^\circ, 60^\circ]$ ， $\theta$  模糊子集的论域为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，量化因子  $K_2=6/60=0.1$ 。输出变量  $u$  的论域范围为  $[-15^\circ, 15^\circ]$ ， $u$  模糊子集的论域为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，比例因子  $K_3=15/6=2.5$ 。

模糊控制器采用三角型隶属函数构建。根据转向的控制精度和控制器运算量的要求，隶属子集分布方式为：中值附近密集，远离中值稀疏<sup>[28-30]</sup>。根据人工转向试验和模糊控制器常规方法制定了初步规则。使用初步规则在采集平台上进行了前期试验，对规则进行了调整，当横向偏距绝对值大于 1.5 m 时称为大偏距，横向偏距小于 1.5 m 时称为小偏距；同时设定当车体按照当前航向行驶使得车体远离目标直线则此时的航向偏差为大偏差，如果是靠近目标直线则此时的航向偏差为小偏差。对应几种典型的横向偏距和航向偏差构成状态：1) 大偏距，大偏差；2) 大偏距，小偏差；3) 小偏距，大偏差；4) 小偏距，小偏差，如图 5 所示。大偏距时主要以横向偏距为主，控制器的输出量  $u$  值较大控制车体迅速转向使得横向偏距快速减小，在小偏距时主要以航向偏差为主，控制器的输出量  $u$  值较小控制车体缓慢转向使航向偏差得以调整，能够在靠近目标直线时减小横向偏距的波动。同时制定了横向偏距  $d$ 、航向偏差  $\theta$  和输出量前轮转角  $u$  的模糊控制规则（见表 1），由该推理规则依据 Mamdani 模糊推理方法输出隶属度函数反模糊化后形成二维查询表，依据查询表可以根据输入查询出前轮的控制转角。



注：图中只画出了取横向偏距  $d$  为正值时（即在目标直线右侧）横向偏距和航向偏差  $\theta$  构成关系的几种典型图，横向偏距为负时对应的关系图是与之对称的，图中不再赘述。

Note: The map draws several typical diagram of lateral offset  $d$  and course deviation  $\theta$  composing when the lateral offset is positive (on the right side of the target line). It is symmetrical with the digram of lateral offset and course deviation composing when the lateral offset is negative. There is no need to be drawn in this figure.

图 5 几种典型的横向偏距和航向偏差构成关系

Fig.5 Typical types of lateral offset and course deviation composing

表 1 模糊控制器规则  
Table 1 Fuzzy control rules

航向偏差 Course deviation $\theta$	横向偏距 Lateral offset $d$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PB	PM	PS	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NB
PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NB	NB	NB

注：液压采集平台前轮转角顺时针变化时为正，逆时针变化为负。表中虚线框表示的是横向偏距为正时，红色虚线框内为大偏距，大偏差控制规则；蓝色虚线框内为大偏距，小偏差控制规则；绿色虚线框内为小偏距，大偏差控制规则；黑色虚线框内为小偏距，小偏差控制规则。当横向偏距为负时的控制规则与之关于中心对称，表中不再用虚线框画出。表中 7 个不同的字符为输入输出的 7 个语言变量，分别为正大 (NB)、正中 (NM)、正小 (NS)、中间 (ZE)、负小 (PS)、负中 (PM)、负大 (PB)。

Note: Clockwise rotation of the front wheel is positive, and anti-clockwise rotation is negative. When the lateral offset is positive, the control rules in the red dashed box is for large offset, large deviation; blue dashed box for large offset, small deviation; green dashed box for small offset, large deviation and black dashed box for small offset, small deviation. When the lateral offset is negative, the control rules is central symmetrical with the previous rules. So, it is no longer marked with dashed box in the table. The 7 characters in the table are 7 language variables of input and output, which are positive large (NB), positive middle (NM), positive small (NS), median (ZE), negative small (PS), negative middle (PM) and negative large (PB).

### 2.3 纵向定速 PID 控制器设计

通过位置式 PID 控制器跟踪纵向目标速度，其离散形式方程为

$$U(k) = k_p [e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1))] \quad (3)$$

式中  $T$  为控制周期， $T_D$  为微分时间常数， $T_I$  为积分时间常数， $k_p$  为比例系数， $e(k)$  为第  $k$  时刻的速度误差， $U(k)$  为  $k$  时刻 PID 控制器的输出。采用 Z-N 的方法确定比例系数  $P$  为 100，微分系数  $D$  为 40，积分系数  $I$  为 50。

车体速度控制随着控制电压的变化而变化，而控制电压在控制器中本质是数字量，经过 D/A 转换器转换为模拟电压后输出。由于车体本身的静力矩，车体的启动电压  $V_0$  为 2.1 V，对应的数字量为 2 400，为了使得车体能够快速启动，最终控制电压的数字量是由  $U(k)$  和启动电压数字量两部分构成为

$$OUT = U(k) + 2\ 400 \quad (4)$$

式中 OUT 是控制电压最终的数字输出量。

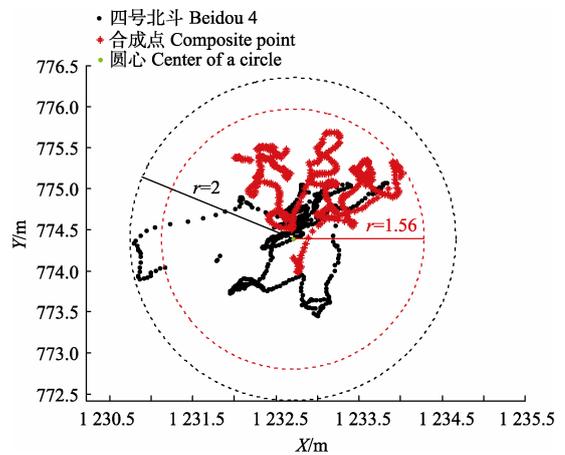
在纵向定速 PID 控制器设计的过程中对积分项设置了上下限，以避免控制量随着时间的延长而无限增大，同时将  $U(k)$  大小范围限定在 (-360, 840)，对应的控制电压分别为车体的最小行驶电压和最大可调电压。

### 3 多北斗模块数据融合方法

针对现有使用的北斗模块定位精度不高问题，通过对北斗定位误差来源进行分析，本文利用随机误差的补偿性原理将 3 个低精度的北斗定位模块以水平等边三角形的方式放置，同时将接收到的 3 个北斗定位数据求算术平均值（称为合成点）作为等边三角形的中心定位数

据以降低随机误差，提高北斗的定位精度。

为了评估本方法对提高定位精度的效果，对此开展试验和数据分析。将 1、2、3 号 3 个北斗接收模块以等边三角形（边长为 1 m）的方式水平放置在信息采集平台上，同时将四号北斗接收模块和高精度的司南北斗/GNSS 接收机（定位精度为 2 cm，市场价格¥55 000）一同放在等边三角形的中心位置。设定 4 个北斗接收模块的定位和移动接收机 COM1 口输出频率均为 2 Hz，利用 STM32F4 从机同步接收 4 个北斗定位模块数据，利用串口助手接收高精度接收机的定位数据，持续接收 5 min，总计获得 600 组数据。对散点数据进行分析可知散点的位置看似是杂乱无章的，但总分布在一定的区域内，以高精度定位点为圆心绘制合成点和四号北斗散点的包络图，用圆半径的大小来衡量定位精度，比较合成点与 4 号北斗定位散点包络圆如图 6 所示。



注：X 为经纬度坐标转换为平面直角坐标后的横坐标，m；Y 为经纬度坐标转换为平面直角坐标后的纵坐标，m。

Note: X is the abscissa of the latitude and longitude coordinates converted to the plane diagonal coordinates, m; Y is the ordinate after the latitude and longitude coordinates are converted into plane cartesian coordinates, m.

图 6 定位点包络圆半径对比图

Fig.6 Comparison chart of positioning point locus

对获得的定位数据进行分析得到，单个北斗定位散点容易发生偏移，合成点则较为稳定和集中，高精度接收机得到散点分布在 2 cm 的圆内。由图 6 比较四号北斗和合成点的包络圆的大小可知，同心圆半径从 2.0 m 降到了 1.56 m。为了进一步验证该方法的有效性，分别在华中农业大学运动场和试验基地按上述方法各做了 3 组试验得到合成点和单个北斗包络圆半径对比结果表，如表 2 所示。

表 2 北斗定位精度试验对比结果表

Table 2 Comparative experimental results of positioning precision of Beidou

试验序号 Serial number	运动场 Sport ground		试验基地 Test base	
	单点圆 Single point/m	合成点圆 Composite point/m	单点圆 Single point/m	合成点圆 Composite point/m
1	2.15	1.56	2.06	1.52
2	2.08	1.42	1.90	1.40
3	1.96	1.49	2.11	1.58
平均半径	2.06	1.49	2.02	1.50

由表 2 可知, 3 个北斗均值法求定位点的方法能够提高北斗模块的静态定位精度, 多组试验表明, 其平均静态定位精度从 2.06 m 提高到了 1.50 m。

采集平台在行走过程中是移动的, 为了评估本方法在移动过程中定位精度的效果, 开展了动态定位精度试验。选取华中农业大学试验基地一条长度 70 m 水泥路面, 以相同的方法将定位模块和高精度接收机放置在采集平台上, 通过人工遥控的方法控制采集平台沿着直线以 0.4 m/s 行走, 利用电脑将接收到的定位数据保存下来, 并将定位数据动态点连起来得到轨迹曲线如图 7 所示。

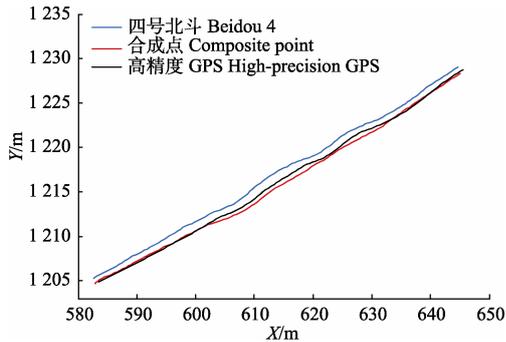


图 7 定位点轨迹曲线对比图

Fig.7 Comparison chart of positioning point locus curve

图 7 中以高精度的接收机得到的轨迹曲线为标准线 (黑色), 合成点轨迹曲线 (红色) 相比于四号北斗轨迹曲线 (蓝色) 更加靠近于标准线, 同一时刻合成点的轨迹曲线偏离标准线最大值为 0.78 m, 最小值为 0.057 m, 平均值为 0.32 m。四号北斗轨迹曲线偏离标准线的最大值为 2.32 m, 最小值为 0.79 m, 平均值为 1.18 m, 合成点动态定位精度高于四号北斗单点精度。

由动态定位试验知: 3 个北斗均值法求定位点的方法能够获得高于单个模块车体定位精度, 动态定位精度为 0.78 m 以内。

## 4 运动控制器试验

田间信息采集平台的定速跟踪试验在华中农业大学现代农业科技试验基地旱田进行, 速度控制器的软件框架由 C 程序在 STM32F4 主控制器上实现, 分别开展定速试验和横向路径跟踪试验。

### 4.1 定速试验

田间信息采集平台的目标速度设为 0.4 m/s, 速度信息采用 HES-1 024-2MHT 型旋转编码器测得 0.5 s 内的脉冲个数计算获取, 采样频率为 2 Hz。在旱田试验时将车体的油门打到中档, 液压的压强值设为 12 MPa, 车体启动后进入速度控制模式。定速启动试验的试验条件为初始速度和给定电压都为 0, 车体进入速度控制模式后自动启动, 试验结果如图 8a 所示。外部阻力干扰试验以相同的试验条件启动后当车体速度稳定时, 人为给予阻力, 待车体速度降至零速后, 会在 2 s 内上升到设定速度, 试验结果如图 8b 所示。

定速启动试验的结果表明车体启动后在纵向定速 PID 控制器的作用下输出电压逐渐增大使得车速快速达到目标速度, 上升时间在 3 s 内, 稳定后的车体速度稳态误差小于 7%。外部阻力干扰试验的结果表明当速度遇到

外界干扰时, 纵向定速 PID 控制器能迅速调整控制电压使得车体速度恢复到目标速度, 纵向速度的调整时间不超过 3 s, 以上试验表明纵向定速 PID 控制器能够满足速度保持恒定的要求。

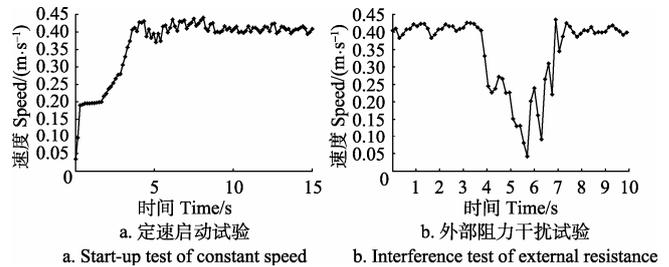


图 8 定速试验

Fig.8 Test of constant speed

### 4.2 横向路径跟踪试验

为了验证横向纠偏模糊控制器的有效性, 根据设计的控制器规则在自主设计的信息采集平台上进行了 3 种典型初始条件下的横向路径跟踪试验。试验中分别设定车辆的初始横向偏距 1.4 m、航向偏差 50° (小偏距、大偏差), 横向偏距为 2.0 m、初始航向偏差为 -10° (大偏距、小偏差), 横向偏距为 2.5 m、航向偏差为 50° (大偏距、大偏差)。

#### 4.2.1 试验过程和方法

试验过程中利用角度传感器采集前轮的实际转角数据, A/D 数据采集模块的采样频率为 2 000 Hz, 每 100 个采样点的均值为前轮转角的反馈量, 这样内闭环的控制频率为 20 Hz, 使得车轮能够在一个控制周期  $T$  内完成对期望转角的控制。由于田间环境复杂, 前轮转动时要求采集平台的速度慢, 设定平台的目标速度为 0.4 m/s, 同时为了更好的测量路径偏差, 在采集平台后轴正中位置上固定一个装满墨水的小水瓶, 并通过细导管在行走的过程中滴下墨水记录行走的轨迹。

试验步骤如下: 1) 将 3 个北斗接收模块按等边三角形的方式放置在采集平台上, 使其中心与车体中心重合, 启动 STM32F4 单片机得到定位数据; 2) 设定目标直线, 选择跟定速试验相同长度约 50 m 的试验田块, 记录直线的两个端点分别为点  $A$  和点  $B$  得到  $AB$  导航线, 用一根长细线贴在地面拉直后放在  $AB$  导航线上作为目标直线便于后面测量横向偏距; 3) 将采集平台停靠在设定的初始偏距和航向偏差位置处, 初始偏距由卷尺测得, 初始航向偏差用安装在采集平台中轴前端的电子罗盘测得; 4) 启动采集平台, 进入速度控制模式控制平台以 0.4 m/s 的速度从初始的位置跟踪目标直线, 同时打开细导管的封口, 让墨水记录行走的轨迹, 待跟踪稳定后停下采集平台, 用厘米精度的卷尺每隔 0.1 m 测得轨迹到目标直线的距离, 记录下横向偏距的变化情况; 5) 改变初始位置偏差重复试验步骤 1) ~ 4)。

#### 4.2.2 试验结果和分析

试验结果如图 9 所示。

横向跟踪试验结果表明, 纵向跟踪速度为 0.4 m/s 时, 小偏距、大偏差试验中信息采集平台在 9 s 横向偏距减小到 0.4 m 内, 11 s 后最终能够在 0.3 m 内稳定的跟踪目标直线; 大偏距、小偏差试验中采集平台 11 s 内迅速靠近目标直线, 15 s 后能稳定地在 0.29 m 内跟踪目标直线; 大偏距、大偏差试验中信息采集平台在 12 s 横向偏距快

速减小到 0.5 m 内, 14 s 后采集平台出现了小幅度的超调但又能很快能调回目标直线附近, 25 s 后能稳定的跟踪目标直线, 且跟踪精度在 0.31 m 以内。

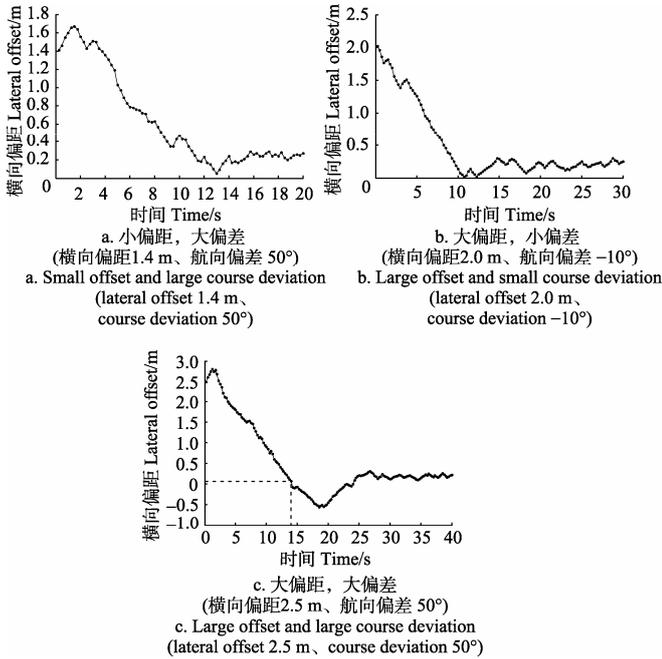


图 9 横向路径跟踪试验  
Fig.9 Test of lateral path tracking

试验结果分析: 1) 大偏距、大偏差和小偏距、大偏差试验中初始横向偏距开始都是增大再迅速减小, 原因是初始航向偏差较大, 采集平台在从大偏差进入小偏差的过程中车身转动使得横向偏距增加。2) 大偏距、大偏差试验中出现了超调, 原因是初始条件下(如图 5a)横向纠偏控制器的输出量  $u$  主要由横向偏距为主, 控制车体快速转向这使得横向偏距能够快速减小, 但进入状态 4 后航向偏差调整的不够, 以至于在调节航向偏差的过程中横向偏距出现小幅超调, 在控制器的调节下超调量迅速减小且能够使得波动加速收敛。而小偏距、大偏差试验中没有出现超调, 这是由于采集平台航向经过充分的调整后航向已经满足要求, 同时采集平台本身系统阻尼较大, 使得横向偏距在 0~0.30 m 波动没有出现超调。总体上田间信息采集平台在不同初始偏差下能够快速稳定地跟踪目标直线。

综合 3 组的直线跟踪精度, 采集平台由初始偏差进入稳定区域以后, 跟踪响应时间、最大值横向偏距、平均绝对横向偏距与标准差如表 3 所示。

表 3 直线跟踪响应时间和跟踪精度  
Table 3 Response time and precision of line tracking

试验序号 Serial number	行驶速度 Travel speed/(m·s <sup>-1</sup> )	跟踪响应时间 Tracking response time/s	最大横向偏距 Maximum lateral offset/m	平均绝对横向偏距 Average absolute lateral offset/m	标准差 Standard deviation/m
1	0.4	11	0.30	0.24	0.035
2	0.4	15	0.29	0.21	0.049
3	0.4	25	0.31	0.26	0.043

由图 9 和表 3 可知, 利用横向纠偏模糊控制器能够使得信息采集平台导航系统快速、稳定的跟踪期望的路

径, 最大横向偏距在 0.31 m 以内, 满足对田间田块信息和作物信息采集的需要。

### 5 结论

1) 在自主设计的田间信息采集平台上以 STM32F4 单片机为控制中心, 采用多个传感器包括三维电子磁罗盘、低精度的 SM1612-MTBD 北斗定位模块、旋转编码器和角度传感器构建了速度控制硬件系统, 设计了横向纠偏模糊控制器和纵向定速 PID 控制器。提出了采用 3 个低精度北斗定位模块进行数据融合获得高于单个模块车体定位精度的方法。

2) 田间试验结果表明: 设计的速度控制器能够实现田间信息采集平台按着规划路径自动定速行走。在设定速度 0.4 m/s 时, 纵向速度稳态误差小于 7%, 在外界扰动下调节时间小于 3 s, 不同的初始偏差条件下能够快速、稳定的跟踪期望的路径, 稳定跟踪后最大横向偏距在 0.31 m 以内, 速度控制精度与路径跟踪精度均满足农业田间信息采集的需要。

该研究为智能信息采集平台在田间复杂环境下的高效作业提供了技术参考, 对农用轮式车辆智能化在农业领域的推广提供一种可行的方法。

### [参考文献]

- [1] Mousazadeh H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50(3): 211—232.
- [2] 赵匀, 武传宇, 胡旭东, 等. 农业机器人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 20—24. Zhao Yun, Wu Chuanyu, Hu Xudong, et al. Research progress and problems of agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [3] 罗锡文, 臧英, 周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 167—173. Luo Xiwen, Zang Ying, Zhou Zhiyan. Research progress in farming information acquisition technique for precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(1): 167—173. (in Chinese with English abstract)
- [4] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 1—10. (in Chinese with English abstract)
- [5] 罗锡文, 区颖刚, 赵祚喜, 等. 农用智能移动作业平台模型的研制[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 83—85. Luo Xiwen, Ou Yinggang, Zhao Zuoxi, et al. Research and development of intelligent flexible chassis for precision farming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(2): 83—85. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王友权, 周俊, 姬长英, 等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 110—113. Wang Youquan, Zhou Jun, Ji Changying, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions

- of the CSAE), 2008, 24(7): 110—113. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孟志军, 王秀, 赵春江, 等. 基于嵌入式组件技术的精准农业农田信息采集系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 91—96.  
Meng Zhijun, Wang Xiu, Zhao Chunjiang, et al. Development of field information collection system based on embedded COM-GIS and pocket PC for precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(4): 91—96. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孟志军, 赵春江, 王秀, 等. 基于 GPS 的农田多源信息采集系统的研究与开发[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 13—18.  
Meng Zhijun, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Field multi-source information collection system based on GPS for precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(4): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [9] 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 186—190.  
Wei Liguang, Zhang Quan, Yan Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186—190. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张漫, 项明, 魏爽, 等. 玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015(增刊 1): 8—14.  
Zhang Man, Xiang Ming, Wei Shuang, et al. Design and implementation of a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015 (Supp.1): 8—14. (in Chinese with English abstract)
- [11] 顾宝兴, 姬长英, 王海青, 等. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 153—160.  
Gu Baoxing, Ji Changying, Wang Haiqing, et al. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 153—160. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵欣. 智能机器人在农业自动化领域的主要应用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10): 360—364.  
Zhao Xin. The main application of intelligent robot in the field of agriculture automation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(10): 360—364. (in Chinese with English abstract)
- [13] 田海清, 应义斌, 张方明. 农业车辆导航系统中自动控制技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 148—152.  
Tian Haiqing, Ying Yibin, Zhang Fangming. Development of automatic control technique for agricultural vehicle guidance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 148—152. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈无畏, 王檀彬, 焦俊, 等. 基于信息融合的多智能体混合体系智能车辆导航[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 1—5.  
Chen Wuwei, Wang Tanbin, Jiao Jun, et al. Design and application for navigation multi-agent of intelligent vehicle based on information fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [15] 程玉柱, 陈勇, 王红星, 等. 遥操作农田信息采集机器人控制系统研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(14): 3080—3083.  
Chen Yuzhu, Chen Yong, Wang Hongxing, et al. Researches on the control system of a tele-operated robot for information collecting in agricultural fields[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(14): 3080—3083. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 151—156.  
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151—156. (in Chinese with English abstract)
- [17] 丁幼春, 廖庆喜, 黄海东, 等. 联合收获机视觉导航控制器设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊 1): 239—243.  
Ding Youchun, Liao Qingxi, Huang Haidong, et al. Design of vision navigation controller for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.1): 239—243. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张闻宇, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 43—50.  
Zhang Wenyu, Ding Youchun, Liao Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43—50. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张铁民, 李辉辉, 陈大为, 等. 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 37—42.  
Zhang Tiemin, Li Huihui, Chen Dawei, et al. Agricultural vehicle path tracking navigation system based on information fusion of multi-source sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 37—42. (in Chinese with English abstract)
- [20] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139—145.  
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of GPS navigation control system for Dong fang hong X-804 tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 139—145. (in Chinese with English abstract)
- [21] Bak T, Jakobsen H. Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(2): 125—136.
- [22] Bakker T, van Asseltk, Bontsema J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field [J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 357—368.
- [23] Juman M A, Wong Y W, Rajkumar R K, et al. A novel tree trunk detection method for oil-palm plantation navigation[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 128: 172—180.
- [24] 顾宝兴, 姬长英, 王海青, 等. 农用开放式智能移动平台研制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 173—178.  
Gu Baoxing, Ji Changying, Wang Haiqing, et al. Development of agricultural opening intelligent mobile platform[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 173–178. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张美娜, 吕晓兰, 陶建平, 等. 农用车辆自主导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 42–47. Zhang Meina, Lü Xiaolan, Tao Jianping, et al. Design and implementation of an automatic guidance system on agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 42–47. (in Chinese with English abstract)
- [26] Fu H D, Wolfgang H, Roland K. Development of a row guidance system for an autonomous robot for white asparagus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 216–225.
- [27] 张美娜, 林相泽, 丁泳前, 等. 基于性能指标的农用车辆路径跟踪控制器设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 40–46. Zhang Meina, Lin Xiangze, Ding Yongqian, et al. Design of path following controllers based on performance index for agriculture vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 40–46. (in Chinese with English abstract)
- [28] Liu Taochang, Hu Jingtao, Ishak A. Adaptive sliding mode control method based on nonlinear integral sliding surface for agricultural vehicle steering control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, (2): 1–10.
- [29] Kurczyk S, Pawelczyk M. Fuzzy control for semi-active vehicle suspension[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration & Active Control, 2013, 32(3): 217–226.
- [30] Mann G K I, Gosine R G. Three-dimensional min-max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning[J]. Fuzzy Sets & Systems, 2005, 156(2): 300–323

## Design and experiment of motion controller for information collection platform in field with Beidou positioning

Ding Youchun, Zhan Peng, Zhou Yawen, Yang Junqiang, Zhang Wenyu, Zhu Kai

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** With the development of precision agriculture technology, agricultural robots which improve efficiency and save labors for agriculture are used for information collection in field, instead of the traditional manual recording and observation. At home and abroad, most of navigation researches of walking platform meet the requirement of tracking precision. However, they mainly use RTK-DGPS (real time kinematics - differential GPS) positioning system, and it is so expensive that it restricts the large-scale promotion of automatic navigation of walking platform to some extent. Consequently, aiming at uniform speed and line tracking problem in complex field environment for information collection platform, a motion controller with transverse correction and longitudinal constant speed control was designed. This paper constructed motion control hardware system using information collection platform as the carrier, STM32F4 32-bit microcontroller was as the control center and multiple sensors were used for obtaining the vehicle status information, including 3D (three-dimensional) electronic compass, low precision Beidou module, rotary encoder and angle sensor. The working principle of the controller could be described as follows: Firstly, 2 points were chosen to determine tracking path. Then, the current position information and the heading angle of the platform in the field were obtained by Beidou module and electronic compass. They were used to calculate the lateral offset and course deviation, which were 2 inputs of fuzzy controller, and the output of fuzzy controller was got through designing control algorithm to control steering angle of front wheel. It ensured information collection platform to always track the goal line. Meanwhile, speed information of the platform was measured by the rotary encoder, which was the input of PID (proportion, integral, derivative) controller. It realized constant speed walking through speed feedback regulation. On the other hand, in order to improve the positioning precision of Beidou module, a method was presented, which was that 3 Beidou modules of low precision were placed in the way of an equilateral triangle, and average positioning data of 3 Beidou modules were obtained at the same time. Then, they were used as the final location data of the center point of the equilateral triangle, which took advantage of compensatory principle of random error to reduce the random error and improve the positioning precision of the Beidou module. By this way, the average positioning precision of the Beidou receiving module was increased from 2.06 to 1.50 m, and the dynamic positioning precision was improved to within 0.78 m. The speed tracking experiment was carried out in the field of Modern Agricultural Science and Technology Experiment Site of Huazhong Agricultural University. The result showed that the control system could work steadily when the vehicle ran at the speed of 0.4 m/s; Proportion coefficient was 100, the differential coefficient was 40 and the integral coefficient was 50. The adjustment time was less than 3 s and the maximum error of speed was less than 7%. When running at the same speed, the initial lateral offset was set to 1.4, 2.0 and 2.5 m, the time required for stable tracking was 11, 15 and 25 s, respectively, and the maximum linear deviation after stabilization was all less than 0.31 m. The research of motion controller on information collection platform not only promotes acquisition ability of field information but also provides technical support for the efficient and intelligent operation of information collection platform in field. At the same time, it offers the possibility of greatly reducing cost in linear tracking, which is of benefit to the promotion of precision agriculture.

**Keywords:** agricultural machinery; control systems; navigation; information collection platform in field; motion controller; positioning precision; line tracking