

文章编号 1004-924X(2013)09-2252-08

## 用于三点定位的激光发射追踪系统

罗亚辉<sup>1,2</sup>, 蒋 蘋<sup>1,2\*</sup>, 胡文武<sup>1</sup>, 吴 畏<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学 工学院, 湖南 长沙 410128;

2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

**摘要:**为研制适用于南方小面积农田的小型农机定位系统,基于激光三点定位原理设计了一套应用双激光源三点定位的激光发射追踪系统。讨论了双激光源三点定位原理,重点描述了激光发射追踪系统的机械结构设计与控制处理电路设计,并提出了基于增量式 PID、具有快速修正功能的卡尔曼滤波追踪算法,解决了激光追踪中的移动目标预估与转弯及变速过程中的误差补偿问题。一系列实验结果表明:不同速度下,两个激光发射器所发射的激光均能较好地追踪激光接收器靶标中心,最大偏差为 $\pm 2.8$  cm,能满足 200 m 内误差小于 $\pm 4$  cm 的作业机械定位需求。所提出的算法可靠有效,为农田作业机械无人驾驶和田间数据定点采集奠定了基础。

**关键词:**激光发射追踪系统;三点定位;卡尔曼滤波;小型农机具

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2252

## Laser emitting and tracking system used for three-point location

LUO Ya-hui<sup>1,2</sup>, JIANG Ping<sup>1,2\*</sup>, HU Wen-wu<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern  
Agricultural Equipment, Changsha 410128, China)

\* Corresponding author, E-mail: teacher\_jp@163.com

**Abstract:** To develop a location system for small agricultural machines in the Chinese south, a laser emitting and tracking system based on double laser-emitter and three-point location was designed based on the laser three-point theory. The theory of double-laser-emitter and three-point location was introduced; then, the laser emitting and tracking system was designed, including the designs of working mechanism and controlling circuit for the laser emitter. The Kalman filtering algorithm based on an incremental PID with quick correction functions was proposed to estimate the moving targets in laser tracking and to compensate the errors in changing speeds and turning corner of the machine. A series of experiments were performed. The experiment results show that the targets of laser receiver can be tracked dynamically by both laser emitters in real-time, and the maximum deviation is  $\pm 2.8$  cm, which meets the location requirement of an autotracked-driving farming machine for an accuracy of  $\pm 4$  cm within 200 m. For the reliable and effective algorithm, it can lay a foundation for unmanned driving of farmland machines and data collection in farming fields.

**收稿日期:** 2013-03-26; **修订日期:** 2013-05-07.

**基金项目:** 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2011BAD20B08); 湖南省科技厅重点资助项目 (No. 2013NK2004); 湖南省教育厅重点资助项目 (No. 12A063)

**Key words:** laser emitting and tracking system; three-point location; Kalman filtering; small agricultural machine

## 1 引言

精确定位技术是实现农田作业机械自动驾驶和处方农业的基础技术之一,在农业机械对靶喷洒、精量施肥、收割测产、自动栽插等作业中有着广泛的用途,是现代智能农业机械研究的一个重要内容<sup>[1-4]</sup>。

目前,定位技术的发展从有线定位到无线定位,从视觉定位到地磁定位。在农田作业机械中,应用较广的有 GPS 定位系统、机器视觉技术、惯性定位技术和光学定位技术。由于精度高的 GPS 定位系统价格极为昂贵,而价格较低的 GPS 定位系统无法满足定位需求;因此, GPS 定位系统不适于南方小面积农田的低成本小型农机定位。机器视觉定位技术具有目标信息完整、长时间工作稳定等优点,但其定位精度受地面杂物、雨雾及泥水等的影响较大,因此在南方农田的野外恶劣环境下工作时会受到一定限制;惯性传感器是一种短时间工作定位精度较高的自主式定位方式,且不受天气条件变化的影响,但它存在累积误差,长时间工作其定位精度就会下降,因此不适合单独用于南方农机定位<sup>[5-9]</sup>。

激光定位技术具有人眼安全、体积小、波束窄、成本低、无电磁干扰、距离及位置探测精度高等优点,已广泛应用于环境监测、航天、通信、导航和定位等技术领域,在农业机械定位系统中的应用也受到很多研究者的重视。美国佛罗里达大学 Subramanian V 等研究了基于机器视觉技术与激光雷达的拖拉机自动导航系统<sup>[10]</sup>; B. Shirinzadeh 等使用基于激光干涉技术的传感和测量方法完成了对机器操作手的精确定位和激光干涉引导,使机器人或者机械手能够沿预定的路径实现高精度定位运动<sup>[11]</sup>。在国内,中国农业大学张凯良等研究了基于机器视觉与激光辅助定位方法的草莓采摘机器人,并对自然环境下生长的长圆锥型草莓进行了试验<sup>[12]</sup>;西南科技大学刘焕玲等提出一种利用安装在云台上的一维激光测距仪定位移动机器人的方法,在 3 m 的定位半径范围内,其定位精度在 2 mm 左右<sup>[13]</sup>。由于当前常用的激光定

位大多是室内小范围的静态、二维定位,定位实时性较差;而室外则主要采用激光引导和激光测距技术,不能满足田间作业的动态定位需求,若采用昂贵的激光跟踪干涉仪定位,成本过高,难以在低成本南方农业机械上进行推广和应用。为研制适用于南方小面积农田工作的精度高而成本相对低廉的小型农机定位系统,本文在激光三点定位原理的基础上,设计了一套激光发射追踪系统,该系统包括了激光发射装置、接收装置与控制单元。研究了基于增量式 PID 快速修正的卡尔曼滤波算法对农田作业机械的快速、准确追踪理论,为农业机械无人驾驶和田间数据定点采集奠定了基础。

## 2 双激光源三点定位原理

双激光源三点定位系统由两个以一定距离( $L$ )固定的激光发射装置和安装在运动机械上的激光接收装置组成<sup>[14-15]</sup>,其原理如图 1 所示。定

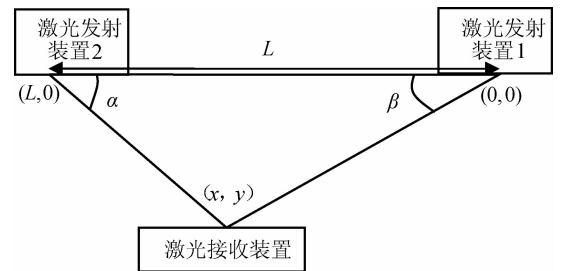


图 1 双激光源三点定位原理图

Fig. 1 Principle diagram of three-point location with double-laser-emitter

义激光发射装置 1 的坐标为原点(0,0),激光发射装置 2 的坐标为( $L,0$ ),当前两个激光发射源所发射的激光与两个激光发射源之间连线(基线)的水平夹角分别为 $\alpha, \beta$ ,则由式(1)可解算出激光接收装置的当前位置坐标( $x, y$ )。

$$\begin{cases} x = L \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha + \tan \beta} \\ y = L \frac{\tan \alpha \cdot \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \end{cases} \quad (1)$$

两个激光发射装置分别由激光发射源、水平

回转步进电机、激光发射源控制处理器和 2.4G 无线数传模块组成,激光发射源产生波长为 635 nm 的红光激光,通过发射源控制处理器产生 38 kHz 的载波信号作为定位用光源。激光发射源安装于水平回转步进电机上,在激光发射源控制处理器的控制下可做 360° 旋转运动,用于追踪运动机械上的激光接收靶标。

激光接收靶标接收到激光发射源发射的激光,在靶标信息处理器单元的配合下,解算出激光的相关着靶信息后,送入运动控制处理单元进行追踪运算,再通过 2.4G 无线数传模块反馈到激光发射源控制单元,从而为激光发射源的运动趋势提供参考。与此同时,激光发射源控制处理器实时动态采集当前两个激光发射源所发射的激光与基线的水平夹角  $\alpha, \beta$ ,通过无线数传模块发送到靶标信息处理单元,并根据  $L, \alpha, \beta$  3 个参数实时解算出激光接收装置当前的坐标  $(x, y)$ 。靶标信息处理单元将当前坐标信息反馈给运动控制处理单元,使运动控制处理单元根据预设的运动规律来控制执行器,进而使农业机械进行预设运动。双激光源三点定位系统的组成框图如图 2 所示。

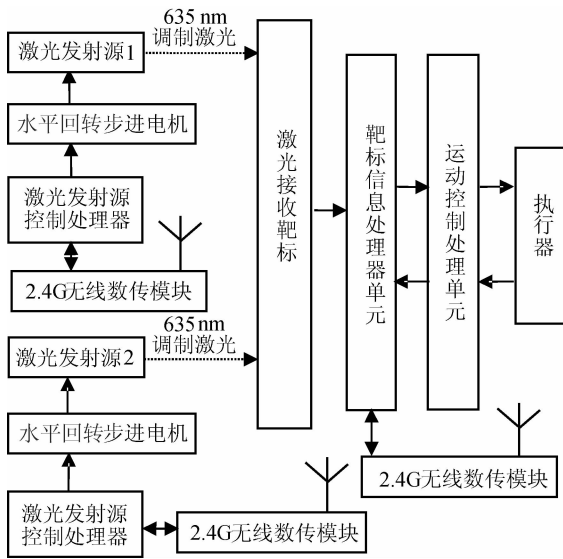


图 2 双激光源三点定位系统组成框图

Fig. 2 Block diagram of double-laser source and three-point location system

### 3 激光发射追踪系统机械结构设计

激光发射追踪系统的机械结构主要包括调整

激光发射源水平的水平微调机构和带动激光发射源旋转的步进电机等,如图 3 所示。

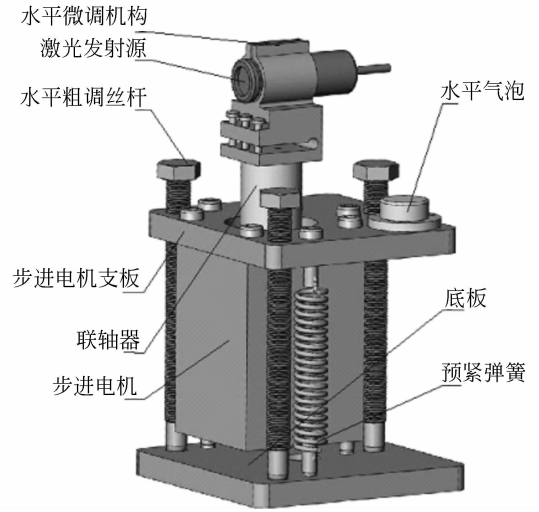


图 3 激光发射追踪系统机械结构图

Fig. 3 Mechanical structure of laser emitting and tracking system

水平粗调丝杆与预紧弹簧各 3 根,安装于步进电机支板和底板之间,配合水平气泡,用于粗调步进电机支板的水平度,使水平度控制在一定范围内,以便于水平微调机构的细调。

水平微调机构用于细调机构水平,以避免激光发射源在形成激光扫描平面时因高度偏差而使激光信号在追踪激光接收靶标的过程中发生脱靶。如图 4 所示,水平微调机构主要由激光发射源安装孔、水平微调螺钉、水平气泡和水平调整支架等构成。

水平微调螺钉有两组,每组各 3 个微调螺钉,

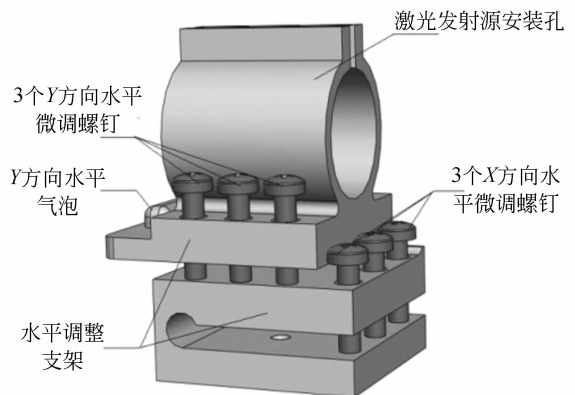


图 4 水平微调机构结构图

Fig. 4 Structure of horizontal fine adjusting mechanism

分别用于 X 方向与 Y 方向调平。其中,两边的两个螺钉用于控制平面俯角;中间的用于控制平面俯角,配合水平气泡,其水平调整精度为 ±0.1', 满足系统要求。

联轴器将水平微调机构与步进电机轴相连,使步进电机能带动激光发射源水平旋转,形成实时追踪激光接收靶标的激光扫描平面。整个机构工作时安装在三脚架上,便于野外作业时激光发射装置的高度调整,因此底板上有螺纹孔,以方便机构安装。

### 4 激光发射追踪系统控制单元设计

激光发射控制处理器主要控制激光发射源发出激光信号,通过无线数传模块完成步进电机当前步进角度的传输,同时在运动控制处理器追踪算法的作用下,接收所需的激光发射器旋转角速度的控制参数,精确控制步进电机旋转以实时追踪激光接收靶标。系统控制单元的硬件电路图如图 5 所示。

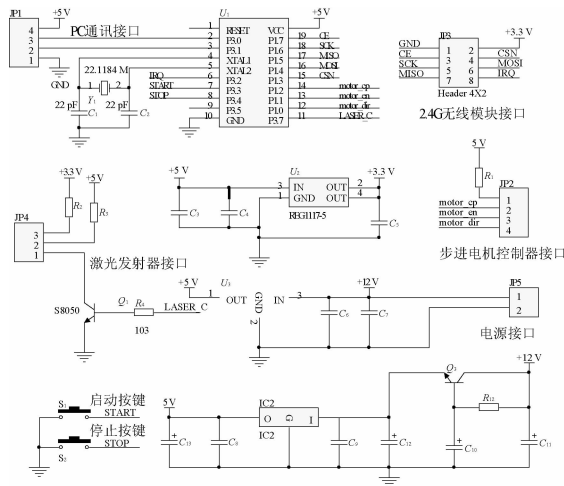


图 5 激光发射追踪系统控制单元硬件电路图

Fig. 5 Hardware circuit of controlling unit for laser emitting and tracking system

激光发射追踪系统的控制单元硬件电路主要由单片机模块、通讯模块与电源模块等组成。单片机模块为中央处理单元,型号为 STC12C5620AD,其定时器产生频率为 38 kHz 的载波信号,用作激光信号的调制源,并采用 PCA 寄存器实现步进电机脉冲数的记录。为实现定位解算,系统需与激光接收靶标信息处理单元进行数据交换,因此

通讯模块采用模拟 SPI 接口,由 2.4G 无线数传模块进行数据的发送与接收。电源模块主要用于提供稳定可靠的供电电源;为降低电源对无线数传的干扰影响,增大无线通信距离,在设计中采用有源滤波的方式,并由降压芯片 REG1117 为无线数传模块提供 3.3 V 的工作电源。按键开关 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 用于控制整个系统的启动与停止控制。

### 5 激光追踪算法设计

为使两个激光发射源所发出的两束激光能时刻追踪到激光接收装置的靶标中心,提高定位精度,本文研究了基于 PID 快速修正的卡尔曼滤波追踪算法,通过预估激光发射源的旋转角速度参数来实现精确追踪控制。

在运算中,为降低处理器的运算负担,通过分析南方农机的运动规律,在应用卡尔曼滤波算法时采用匀速直线运动模型对运动状态进行简化;同时,采用增量式 PID 算法实现作业机械在变速过程与转弯过程中的误差补偿,以降低激光信号着靶位置与靶标中心的偏差,使激光发射源所发射的激光信号能可靠跟踪安装在作业机械上的激光接收靶标。

#### 5.1 卡尔曼滤波算法

为实现激光接收靶标在运动时的跟踪,本文采用卡尔曼滤波算法<sup>[16-19]</sup>预估移动目标位姿。

在目标为匀速运动,无扰动的情况下,有:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = 0, i = 1, 2, 3. \tag{2}$$

式中:下标  $i=1, 2, 3$  分别与目标的距离、方位角、俯仰角 3 个状态参数相对应。当目标的各状态参数在坐标轴间没有相交时,可以分别进行运算,这里以距离为例进行分析。

状态方程为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k, \tag{3}$$

式中: $\mathbf{x}_{k+1}$  为第  $k+1$  次的状态值。

其中:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

测量方程为:

$$y_{k+1} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{k+1} + n_{k+1}, \tag{5}$$

式中: $y_{k+1}$  为第  $k+1$  次的距离测量值; $n_{k+1}$  为第  $k+1$  次的测量噪声。

其中:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, n_{k+1} = \begin{bmatrix} n_{k+1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

测量噪声方差为:

$$\mathbf{V}_{n_k} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{V}_{n_k}$  为测量噪声方差;  $\sigma_r^2$  为变速加速度均方值。

一次预估及滤波方程为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_k, \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1}(y_{k+1} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}), \quad (9)$$

式中:  $\hat{\mathbf{x}}_n$  为第  $k$  次的预估;  $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$  为根据第  $k$  次的值所得到的第  $k+1$  次的预估值;  $\mathbf{K}_{k+1}$  为对应的滤波增益。

其权(增益)矩阵为:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}\mathbf{C}^r\mathbf{V}_{n_{k+1}}^{-1} = \mathbf{P}_{k+1}\mathbf{C}^r[\mathbf{C}\mathbf{P}_{k+1|k}\mathbf{C}^r + \mathbf{V}_{n_{k+1}}]^{-1}, \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{P}_{k+1}$  为对应的滤波误差协方差;  $\mathbf{P}_{k+1|k}$  为对应的一步预测误差协方差。

采用两点法求目标的初始运动状态, 令:

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_0 \\ \frac{1}{T}(x_0 - x_{-1}) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由定义得:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{T} \\ \frac{1}{T} & \frac{2}{T^2} \end{bmatrix} \sigma_r^2. \quad (12)$$

由于目标为匀速运动, 因此并没有变速性的扰动, 故:

$$\mathbf{V}_{n_k} = 0. \quad (13)$$

由此得:

$$\mathbf{P}_k = \frac{12\sigma_r^2}{(k+1)(k+2)(k+3)} \cdot \begin{bmatrix} \frac{(k+1)(2k+3)}{6} & \frac{k+1}{2T} \\ \frac{k+1}{2T} & \frac{1}{T^2} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

由此求得滤波增益, 即权矩阵为:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k\mathbf{C}^r\mathbf{V}_{n_k}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2(2k+3)}{(k+2)(k+3)} \\ 6 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

由上述二式可以看出, 滤波误差协方差与滤波增益都随  $k$  的增大而逐渐趋于零, 即滤波的结

果是趋近于匀速运动轨迹。

## 5.2 增量式 PID 控制算法

由于卡尔曼滤波算法采用匀速直线运动模型, 因此难以保证激光信号时刻追踪到激光接收靶的中心位置, 故系统需要通过增量式 PID 控制算法进行误差补偿。根据:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d (e(k) - e(k-1)), \quad (16)$$

式中:  $u(k)$  为控制量;  $k_p$  为比例系数;  $k_i$  为积分系数;  $k_d$  为微分系数;  $e(k)$  为偏差值;  $e(j)$  为  $j$  时刻的偏差。

由式(16)得:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = k_p (e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)). \quad (17)$$

## 5.3 算法融合

由于发射源激光所追踪的激光接收靶安装的试验载体为农田作业机械, 在设计时将它视为一个质点。如图 6 所示,  $O$  点为一个激光发射源所在位置;  $A_1$  点为激光接收靶标中心, 设它为作业机械的质心位置;  $B_1$  点为当前激光信号在接收靶标上的着靶位置; 先由卡尔曼滤波算法预估作业机械的运动趋势, 得到下一时刻作业机械的质心位置  $A_2$  点, 由此得到下一个周期  $T$  时刻内的速度  $v_k$ , 从而计算得:

$$\omega_k = v_k / r, \quad (18)$$

式中:  $r$  为激光发射源到激光接收靶标的实时距离, 由激光三点定位系统解算所得的激光接收靶标的实时坐标值  $(x, y)$  计算得到;  $\omega_k$  为由卡尔曼

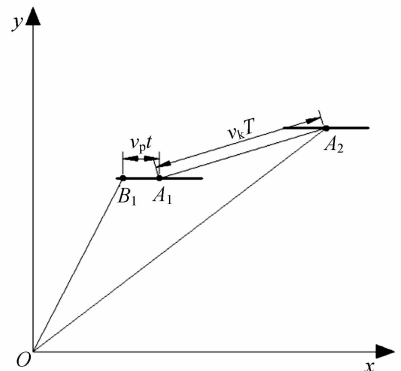


图 6 激光追踪示意图

Fig. 6 Schematic diagram of laser tracking

滤波算法预估得到的  $T$  时刻内激光发射源的旋转角速度。

同时,为降低激光信号着靶位置与靶标中心的偏差,即  $B_1$  点与  $A_1$  点偏差,以靶标的中心点  $A_1$  点为增量式 PID 算法的目标质点,由 PID 算法得其运算周期  $t$  时刻内的运动速度  $v_p$ ,计算得:

$$\omega_p = v_p / r, \quad (19)$$

式中: $\omega_p$  为  $t$  时刻内激光发射源的旋转角速度。

由于增量式 PID 算法用于修正激光信号着靶位置在激光接收靶标上的偏差,而卡尔曼滤波用于预估激光接收靶标所在农业机械的整体运动趋势;因此,为提高激光追踪的精确度,设置 PID 算法的周期  $t$  小于卡尔曼滤波算法的周期  $T$ 。在实际运算中,取  $T = 5t$ 。将卡尔曼滤波算法与 PID 算法所得的激光发射源旋转角速度叠加,得:

$$\omega = \omega_p + \omega_k, \quad (20)$$

式中: $\omega$  为激光发射源的实时旋转角速度。

由激光接收部分的运动控制处理单元进行追踪运算后,将角速度值  $\omega$  通过无线数传模块传输到激光发射控制处理器,精确控制步进电机旋转,以实现激光发射源发射的激光信号对作业机械上激光接收靶标的实时可靠追踪。

## 6 试验分析

为测试激光发射追踪系统自动追踪的可行性及稳定性,结合激光接收装置,研究小组进行了激光追踪动态响应试验。

### 6.1 试验方案

将两个激光发射装置分别安装固定在三脚架上,相距 50 m,激光接收装置则安装在 2ZG630A 高速插秧机上,插秧机后轮上安装编码盘用于监测其移动速度,由 PC 无线监控平台控制插秧机以 0.2~2.0 m/s 速度在两个激光发射源的激光扫描范围内沿 S 型匀速移动。

自制的激光接收靶标上安装的激光接收传感器阵列列为  $32 \times 32$ ,它分为上下两部分,分别用于接收两个激光信号,因此每部分为  $16 \times 32$ ;设定每行第 16 个传感器为中心接收管,定义激光信号追踪到左边的接收管时其偏差个数为负值、追踪到右边的接收管时其偏差个数为正值。

PC 监控平台通过无线采集数据,采样频率为 1 Hz,时间为 100 s,数据通过 EXCEL 软件导出。

### 6.2 实验数据分析

图 7 为插秧机速度分别为 0.5, 1.0, 1.6 m/s 时激光追踪中心偏差曲线图。

从图 7(a)可以看出,在激光追踪过程中,最大偏差为 3 个激光接收传感器,出现概率为 1.01%,处于中心位置的输出次数比率为 59.09%;从图 7(b)可以看出,激光追踪的最大偏差为 4 个激光接收传感器,出现概率为 1.01%,处于中心位置的输出次数比率为 52.53%;从图 7(c)可以看出,激光追踪的最大偏差为 4 个激光接收传感器,出现概率为 2.02%,处于中心位置的输出次数比率为 50.51%。

由图 7 可得知,随着速度的增加,激光追踪中心的着靶概率略有下降,但在整个追踪过程中并未出现脱靶现象,能一直追踪到激光接收靶标,其最大偏差为 4 个激光接收传感器。由此说明,本文提出的算法可靠,能满足双激光源三点定位的使用需求。

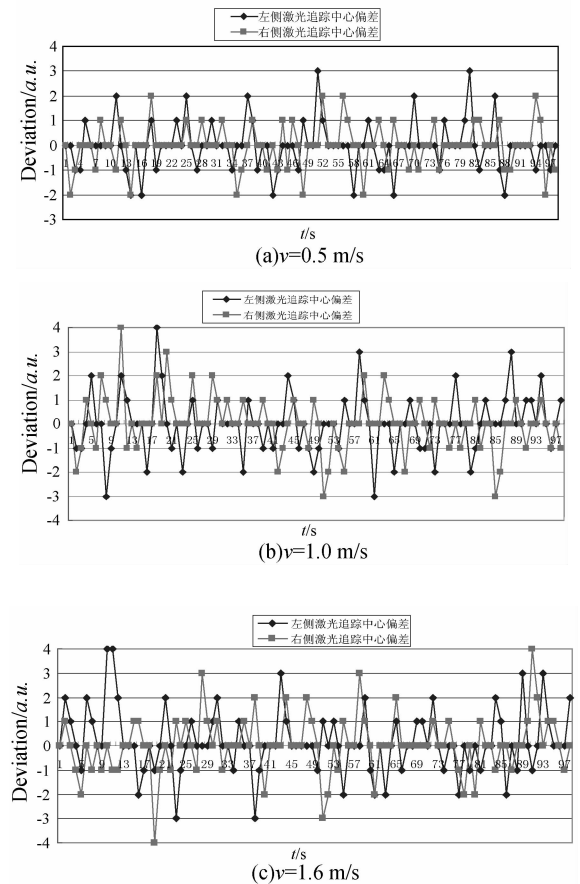


图 7 激光追踪中心偏差曲线图

Fig. 7 Deviation curves of laser tracking center at different speeds

## 7 结 论

本文提出了一种基于双激光源三点定位原理的激光发射追踪系统,设计了用于三点定位的激光发射装置的机械结构与控制单元硬件电路,提出了基于增量式 PID 快速修正的卡尔曼滤波激光追踪算法。试验结果表明,不同速度下两个激光发射器所发射的激光均能较好地追踪激光接收器靶标中心,未出现脱靶的情况,最大偏差为 4 个

激光接收传感器,由于紧密排列的每个传感器尺寸距离为 0.7 cm,换算得扫描弧长偏差最大为  $\pm 2.8$  cm,能满足 200 m 范围内误差小于  $\pm 4$  cm 的南方农田作业机械的定位需求。

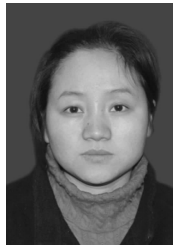
本研究解决了激光追踪中的移动目标预估与转弯及变速过程中的误差补偿问题,实现了激光发射源对安装于农田作业机械的激光接收靶标的快速、准确追踪,为农田作业机械无人驾驶和田间数据定点采集奠定了基础,具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 何东健,何勇,李明赞,等. 精准农业中信息相关科学问题研究进展 [J]. 中国科学基金,2011,1(1): 10-16.  
HE D J, HE Y, LI M Z, *et al.*. Research progress of information science-related problems agriculture [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2011, 1(1): 10-16. (in Chinese)
- [2] 张小超,胡小安,苑严伟,等. 精准农业智能变量作业装备研究开发 [J]. 农业工程,2011,1(3): 26-32.  
ZHANG X CH, HU X A, YUAN Y W, *et al.*. Research and development of intelligent agricultural machinery on precision agriculture [J]. *Agricultural Engineering*, 2011, 1(3): 26-32. (in Chinese)
- [3] 蒋蕙,胡文武,罗亚辉,等. 机滚船遥控驾驶系统设计 [J]. 农业工程学报,2009,25(6): 120-124.  
JIANG P, HU W W, LUO Y H, *et al.*. Design of the remote control driving system for rolling boat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(6): 120-124. (in Chinese)
- [4] 柳平增,孟祥伟,田盼,等. 基于物联网的精准农业信息感知系统设计 [J]. 计算机工程与科学,2012,34(3): 137-141.  
LIU P Z, MENG X W, TIAN P, *et al.*. Design of a precision agriculture information perception system based on the internet of things [J]. *Computer Engineering & Science*, 2012, 34(3): 137-141. (in Chinese)
- [5] 张智刚,罗锡文,胡炼,等. 4 种 DGPS 模块动态定位精度测试与分析 [J]. 华南农业大学学报,2010(1): 102-107.  
ZHANG ZH G, LUO X W, HU L, *et al.*. Study on dynamic positioning precision of 4 kinds DGPS modules [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2010(1): 102-107. (in Chinese)
- [6] YOSHISADA N, NAONOBU U, YUTAKA K, *et al.*. Automated rice transplanters using global positioning and gyroscopes [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 43(3): 223-234.
- [7] RAUL M. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture [J]. *Computer and electronics in agriculture*, 2008, 62: 94-106.
- [8] BENSON E R, REID J F, ZHANG Q. Machine vision based guidance system for an agricultural small grain harvester [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2003, 46(4): 1255-1264.
- [9] 高宗余,李德胜,王跃宗. 结合零速检测的微惯性系统混合滤波 [J]. 光学精密工程,2010,18(2): 377-383.  
GAO Z Y, LI D SH, WANG Y Z. Design of hybrid Unscented particle filtering combining with ZUPT for vehicle MINS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 377-383. (in Chinese)
- [10] SUBRAMANIAN V, BURKS T F, ARROYO A A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 53(2): 130-143.
- [11] SHIRINZADEH B, TEOH P L, TIAN Y, *et al.*. Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26: 74-82.
- [12] 张凯良,杨丽,张铁中. 草莓采摘位置机器视觉与激光辅助定位方法 [J]. 农业机械学报,2010,41

- (4):151-156.
- ZHANG K L, YANG L, ZHANG T Z. Object locating method of laser-assisted machine vision for strawberry-harvesting [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 151-156. (in Chinese)
- [13] 刘焕玲, 刘桂华, 刘钦. 基于一维激光测距仪的室内移动机器人定位[J]. 工具技术, 2011, 45(10): 79-83. LIU H L, LIU G H, LIU Q. Localization method based on one-dimensional laser range finder for indoor mobile robot [J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(10): 79-83. (in Chinese)
- [14] 蒋蘋, 罗亚辉, 王奕, 等. 激光三点动态定位方法及系统: 中国, ZL200910308901.6[P]. 2012. JIANG P, LUO Y H, WANG Y, et al.. Laser & three-point dynamic location method and system :China, ZL200910308901.6[P]. 2012. (in Chinese)
- [15] JIANG P, LUO Y H, HE Q H, et al.. The design of three-point laser localization system [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2012, 7(2): 144-148.
- [16] 魏彤, 郭蕊. 自适应卡尔曼滤波在无刷直流电机系统辨识中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2308-2314.
- WEI T, GUO R. Application of adaptive Kalman filtering to system identification of brushless DC motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2308-2314. (in Chinese)
- [17] 刘静, 姜恒, 石晓原. 卡尔曼滤波在目标跟踪中的研究与应用[J]. 信息技术, 2011(10): 174-177. LIU J, JIANG H, SHI X Y. Study and application of Kalman filtering for target tracking [J]. *Information Technology*, 2011(10): 174-177. (in Chinese)
- [18] CHOI D, WAN ROY B. A generalized Kalman filter for fixed point approximation and efficient temporal-difference learning [J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2006, 16(2): 207-239.
- [19] SUBRAMANIAN V, BURKS T V, DIXON W E, et al.. Sensor fusion using fuzzy logic enhanced Kalman filter for autonomous vehicle guidance in citrus groves [J]. *Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2009, 52(5): 1411-1422.

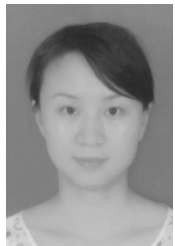
#### 作者简介:



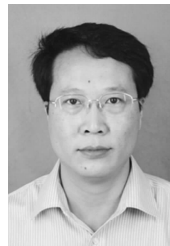
**罗亚辉**(1981—),女,湖南华容人,硕士,讲师,2003年于华中师范大学获得学士学位,2010年于湖南农业大学工学院获得硕士学位,主要从事农业电气化与自动化方面的研究。E-mail: luoyh@hunau.edu.cn



**胡文武**(1984—),男,湖南湘乡人,硕士,助教,2006年,2011年于湖南农业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事农业自动化与智能化方面的研究。E-mail: huwenwu2008@hotmail.com



**吴畏**(1977—),女,湖南汨罗人,博士研究生,讲师,2009年于湖南农业大学获得硕士学位,主要从事农业机械设计 with 试验的研究。E-mail: hnnd\_ww@163.com



**蒋蘋**(1970—),男,四川古蔺人,博士,教授,硕士生导师,1992年于上海交通大学获得学士学位,2003年于国防科技大学获得硕士学位,2012年于中南大学获得博士学位,现为湖南农业大学工学院机电系主任,主要从事农业机械智能控制方面的研究。E-mail: teacher\_jp@163.com

#### 通讯作者: