

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201203012

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130310.2131.001.html>

# 一种基于卡尔曼滤波与模糊算法的 变电站机器人组合导航及控制系统设计

李大伟<sup>1</sup>, 贾鹏飞<sup>1</sup>, 李卫国<sup>1</sup>, 张学龙<sup>1</sup>, 渠展展<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院 电工与新材料技术研究所, 北京 100192)

**摘要:**针对不确定因素较多、外在干扰强的变电站工业现场环境,提出了一种新颖的基于卡尔曼滤波与模糊控制的变电站机器人组合导航及控制系统设计方法,实现机器人自主导航定位、自主行为控制,完成智能变电站无人巡检任务。特别地,设计了一种基于高精度激光雷达的导航子系统,定位的同时兼有电子罗盘功能(即航角测量),有效克服了变电站强电磁干扰环境下电子罗盘失效等问题。现场试验证明,机器人行走轨迹与预设路径十分接近,可以实现强电磁环境下的巡检要求,且具有设计成本低、精度高(亚米级)、实现方便等一系列优点,便于工业应用。

**关键词:**变电站; 机器人; 组合导航; 控制系统; 模糊控制; 激光雷达; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)03-0226-07

中文引用格式:李大伟,贾鹏飞,李卫国,等.一种基于卡尔曼滤波与模糊算法的变电站机器人组合导航及控制系统设计[J].智能系统学报,2013,8(3):226-232.

英文引用格式:LI Dawei, JIA Pengfei, LI Weiguo, et al. A kind of integrated navigation and control system design for substation robot based on the Kalman filtering and fuzzy algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(3): 226-232.

## A kind of integrated navigation and control system design for substation robot based on the Kalman filtering and fuzzy algorithm

LI Dawei<sup>1</sup>, JIA Pengfei<sup>1</sup>, LI Weiguo<sup>1</sup>, ZHANG Xuelong<sup>1</sup>, QU Zhanzhan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical &amp; Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Institute of Electrical &amp; New Materials, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** This paper aims at examining the substation's industrial environment which has a number of uncertainty factors and strong external disturbance. This paper proposes a novel design method for the integrated navigation and control system which is used in a substation intelligent robot based on the Kalman filtering and fuzzy control theory, for the purpose of fulfilling an autonomous navigation, positioning and behavior control, and finishing the unattended inspection task. In particular, a navigation subsystem based on high-precision laser radar has the functions of positioning, and that of electronic compass (for navigation angle measurement), which effectively overcomes the failure of compass in substation with strong electromagnetic interference. The field test shows that the robot's actual track is close to the assigned track, achieving the independent inspection mission in a strong electromagnetic interference environment. In addition, the design also has the advantages of lower cost, higher precision (sub-meter), and more easy implementation for industrial use.

**Keywords:** transformer substation; robot; integrated navigation; control system; fuzzy control; laser radar; Kalman filtering

目前常见的机器人导航系统主要包括黑白线循迹导航、磁导航、GPS/DR 组合导航、视觉图像导航

及激光雷达导航等。不同的导航系统各自有其优缺点,黑白线导航原理简单易行、稳定可靠但易受雨雪天气影响;磁导航成本相对较高且易受强电磁环境干扰;GPS/DR 组合导航<sup>[1]</sup>定位精度高、灵活方便,

收稿日期:2012-03-15 网络出版日期:2013-03-10

通信作者:李大伟. E-mail: myzone2009\_vip@sina.com.

但成本非常高;视觉图像导航基于图像识别与神经网络技术,但其原理复杂,工业实现难度较大。

本文涉及的导航系统采用 DR/LMS 组合导航技术,DR 导航采用常用的惯性导航方法,原理简单。针对 LMS 激光导航系统的研究,文献[2]从最优路径角度,给出了一种全局最优路径算法;文献[3]基于激光雷达进行环境建模、避障检测,提出了一种时变势场导航算法,但只定性而未定量描述了机器人在视觉场内的坐标和位姿分布<sup>[4]</sup>。文献[5]基于激光系统,提出了一种三边与三角测量法,虽然原理简单、定位精度高,但仅适用于理想的实验室环境。文献[6]同样在实验室环境下给出了一种机器人速度跟踪算法,但未能定量地描述位姿坐标问题。

综合目前导航系统的优缺点,本文提出的一种基于卡尔曼滤波<sup>[7]</sup>的 DR/LMS 组合导航系统设计方法,是一种基于多传感器的定位精度优化估计方法,通过数据融合、滤波处理,实现了定位坐标定量化管理,具备导航精度高的优点。特别地,本系统采用的基于多级模糊算法<sup>[8-10]</sup>的控制结构实现了机器人运动系统的多级化闭环控制,优化机器人的行为轨迹的同时,增强了其对复杂工业现场环境的适应能力。

## 1 机器人导航系统原理及应用

本导航系统采用 DR/LMS 组合式设计,各传感器相互融合,通过卡尔曼最优估计原理进行算法设计,提高了导航的精确性与稳定性。

### 1.1 DR 惯性导航系统

图1是DR导航定位系统航位推算的原理图,已知起始点A的定位坐标 $(x_k, y_k)$ 、导航测量角 $\theta_k$ 及光电位移传感器测量里程 $\Delta S_k$ ,可以推算出下一时刻在B点的坐标估计值 $(x_{k+1}, y_{k+1})$ 。式(1)给出了机器人在X、Y轴方向的行驶位移,即

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta S_k \sin \theta_k, \\ y_{k+1} = y_k + \Delta S_k \cos \theta_k. \end{cases} \quad (1)$$

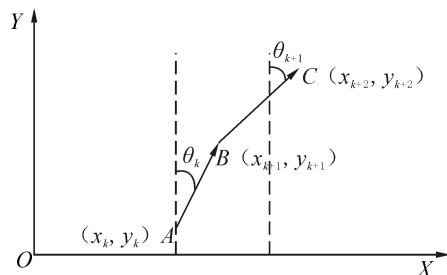


图1 DR系统导航定位原理

Fig.1 The principle of DR navigation and positioning system

需要指出的是,由于机器人本身存在机械误差以及里程计带来的测量误差,DR 系统导航精度随时间具有发散性,定位精度有限,故必须辅助其他导航子系统加以修正。

### 1.2 基于高精度激光雷达 LMS 的自主导航系统

本系统采用了 SICK 公司生产的 LMS 激光雷达全向测距传感器,该测距系统采用双脉冲快速测距技术,以50 Hz的扫描频率实现 360°、20 m范围内障碍物的快速扫描,满足高精度(mm级)测距需求。测距系统与上位机 Labview 软件系统通过以太网接口实现相互通信,数据传输及处理速度能够满足实际工业需求。

#### 1.2.1 全局路径已知条件下的机器人直行段导航定位

直行段导航定位系统原理如图2所示,其定位与导航计算公式分别见式(2)和(3),式中各变量含义及说明可以参见文献[11]。

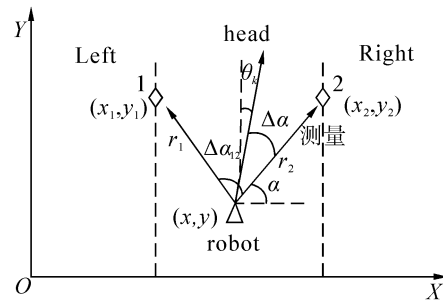


图2 直行段导航定位原理

Fig.2 The principle diagram of navigation and positioning when going straight

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tilde{d}_{12} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \Delta \alpha_{12}}; \\ \cos \beta = \frac{r_2^2 + \tilde{d}_{12}^2 - r_1^2}{2r_2 \tilde{d}_{12}}; \\ k_1 = (x_1 - x_2) / (y_1 - y_2); \\ k_2 = 0; \\ \gamma = \begin{cases} \pi/2, y_1 = y_2, \\ \arctan \left| \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2} \right|, y_1 \neq y_2; \end{cases} \\ \Delta \alpha_m = \pi - \alpha; \\ \Delta \alpha_l = \pi - \beta - \gamma; \\ \theta_k = \Delta \alpha_m - \Delta \alpha_l. \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2.2 全局路径已知条件下的机器人转弯段导航定位

机器人定位坐标的求解同式(2).与直行段不同的是,转弯段预设行走路径不再是直线方向,而是围绕某一圆心的圆弧运动.如图3所示,机器人以 $O_1$ 为圆心,半径为 $R_{\text{mea}}$ (理论值)做圆周运动,其中圆心 $O_1$ 的地理坐标 $(x_{o_1}, y_{o_1})$ 与半径 $R_{\text{mea}}$ 的大小已事先由系统给定.假设由式(2)求得机器人的定位坐标为 $(x, y)$ ,则机器人自主导航的控制量 $\Delta R$ 与 $\Delta \theta$ 的求解方程如式(4):

$$\begin{cases} R_{\text{mea}} = \sqrt{(x - x_{o_1})^2 + (y - y_{o_1})^2}, \\ \Delta R = R_{\text{mea}} - R_{\text{cal}}, \\ \theta = (\pi - \omega_1) + \arccos[(R_{\text{mea}}^2 + r_1^2 - ((x_1 - x_{o_1})^2 + (y_1 - y_{o_1})^2)) / (2 \times R_{\text{cal}} \times r_1)], \\ \Delta \theta = \pi/2 - \theta. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_{\text{cal}}$ 表示机器人定位点与当前圆心 $O_1$ 的测量距离, $\pi$ 为机器人前进方向上激光雷达扫描点的对应角度值, $\omega_1$ 为激光雷达在转弯内侧参考标记1 $(x_1, y_1)$ 处的扫描角度值, $\theta$ 表示机器人前进方向与半径方向的夹角值, $\pi/2$ 则表示理想圆心运动条件下,机器人前进方向即切线方向与半径方向的垂直夹角.

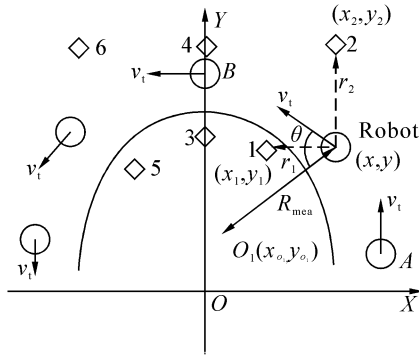


图3 转弯段导航定位原理

Fig.3 The principle diagram of navigation and positioning when turning control

图3中序列1~6分别表示机器人视觉区域内的参考对象,并且各个参考对象的地理坐标已知,机器人可以根据激光雷达,通过数据采样、过滤及滤波算法识别当前环境下的参考距离值,并建立参考对象与参考距离值之间的一一映射关系,准确计算出机器人当前定位坐标及航向角偏差.与直行段不同的是,转弯段可以看作是机器人绕某一固定圆心点的圆周运动,而不同的转弯段可以更新参考圆心坐标来实现自主变轨运动.图3中参考对象1、2的地

理坐标分别为 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ , $r_1, r_2$ 分别表示机器人距离对应参考对象的距离值,由此可以方便地解算出机器人当前的定位坐标 $(x, y)$ .再根据定位坐标 $(x, y)$ 及转弯条件下计算得到的圆心坐标 $(x_{o_1}, y_{o_1})$ 可以计算出机器人距离圆心 $O_1$ 的距离值 $R_{\text{mea}}$ 及机器人朝向与半径方向的夹角值 $\theta$ .将这2个计算量分别与转弯段的理想半径值 $R$ 和理想夹角值 $(90^\circ)$ 作定量比较,得到机器人自主转弯的2个控制量:半径偏移量 $\Delta R$ 与航角偏移量 $\Delta \theta$ ,并将这2个控制量作为模糊控制器的2个控制输入参数,实现控制策略下的机器人导航定位闭环反馈调节.

本定位子系统的主要误差来源有:1)实测道路两侧参考目标设备地理坐标带来的绝对误差;2)激光雷达实测目标距离值时多点滤波等效带来的绝对误差.鉴于上述两子系统的优缺点,为了提高系统定位精度、保证系统运行的可靠性,引入基于卡尔曼滤波的组合导航技术则显得尤为必要.

### 1.3 基于卡尔曼滤波技术的DR/LMS组合导航系统设计及应用

针对DR惯性导航子系统与LMS高精度激光雷达视觉导航子系统各自的优缺点,为了进一步提高系统的导航定位精度,改善系统的稳定性与可靠性,可以以随机线性离散卡尔曼滤波为理论基础,将DR与LMS两导航子系统优势互补,以增强系统的鲁棒性与抗干扰性.

基于卡尔曼滤波模型,对DR/LMS组合导航系统的 $X, Y$ 定位坐标进行卡尔曼滤波,可以得到如下方程.

1) 状态方程:

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \Delta S_{k,k-1} \sin \theta_{k-1} + \Gamma_{(k,k-1)x} W_{(k-1)x}, \\ y_k = y_{k-1} + \Delta S_{k,k-1} \cos \theta_{k-1} + \Gamma_{(k,k-1)y} W_{(k-1)y}. \end{cases}$$

2) 观测方程:

$$\begin{cases} z_{x_k} = x_k + V_{kx}, \\ z_{y_k} = y_k + V_{ky}. \end{cases}$$

式中: $x_k, y_k$ 为机器人在 $X$ 轴、 $Y$ 轴方向的状态位置坐标, $\theta_{k-1}$ 为状态控制量(航向计算角), $\Delta S_{k,k-1}$ 为各采样阶段的转移控制系数, $W_{(k-1)x}, W_{(k-1)y}$ 为DR推算过程噪声序列, $\Gamma_{(k,k-1)x}, \Gamma_{(k,k-1)y}$ 为DR推算过程噪声输入系数, $z_{x_k}, z_{y_k}$ 为激光测距计算得到的机器人定位点的 $x, y$ 坐标值, $V_{kx}, V_{ky}$ 为LMS测量系统等效噪声序列.

系统定位坐标初始状态 $x_0, y_0$ 由系统给定,滤波误差初始值 $P_0$ 已知,系统过程噪声(估计噪声)方差 $Q_k = E(E_k W_k^T)$ 和系统观测噪声(LMS测量噪

声)方差 $R_k = E(V_k V_k^T)$ 已确定,则得到如下滤波求解过程..

1) 状态一步预测:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{k,k-1} \\ \hat{y}_{k,k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{y}_{k-1} \end{bmatrix} + \Delta S_{k,k-1} \begin{bmatrix} \sin \theta_{k-1} \\ \cos \theta_{k-1} \end{bmatrix}.$$

2) 状态估计:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - K_{kx}) & 0 \\ 0 & (1 - K_{ky}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k,k-1} \\ \hat{y}_{k,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{kx} z_{x_k} \\ K_{ky} z_{y_k} \end{bmatrix}.$$

3) 滤波增益:

$$\begin{bmatrix} K_{kx} \\ K_{ky} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{(k,k-1)x}}{P_{(k,k-1)x} + R_{kx}} \\ \frac{P_{(k,k-1)y}}{P_{(k,k-1)y} + R_{ky}} \end{bmatrix}.$$

4) 步预测误差:

$$\begin{bmatrix} P_{(k,k-1)x} \\ P_{(k,k-1)y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{(k-1)x} \\ P_{(k-1)y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_{(k,k-1)x}^2 Q_{(k-1)x} \\ \Gamma_{(k,k-1)y}^2 Q_{(k-1)y} \end{bmatrix}.$$

5) 滤波估计误差:

$$\begin{bmatrix} P_{kx} \\ P_{ky} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - K_{kx})^2 & 0 \\ 0 & (1 - K_{ky})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{(k,k-1)x} \\ P_{(k,k-1)y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{kx}^2 R_{kx} \\ K_{ky}^2 R_{ky} \end{bmatrix}.$$

而对于机器人自主行走控制器的另外一个控制量——导航角,这里不对其作卡尔曼滤波处理,因为其算法的优越性使得导航角的计算精度不受测距仪多点扫描带来的误差影响,导航精度高,仅需加以常用的限幅滤波、均值滤波等算法即可满足控制系统的要求.

## 2 基于模糊算法的机器人行走控制系统设计及应用

通过提取上述机器人导航控制参数,将其作为输入量,通过模糊算法设计,实现机器人的行走运动控制,该算法极大地增强了系统对复杂工业现场环境的适应能力.

图4给出了机器人运动系统的模糊控制流程图.新方法反映了机器人以导航反馈量,即距离偏移量与航角偏移量为控制器输入参数,通过模糊推理、解模糊集,输出电机转速控制量,并将输出响应后的下一次导航定位数据反馈到原系统,通过给定值与反馈值的比较,实现了多级模糊控制策略下的快速响应特性与闭环控制.

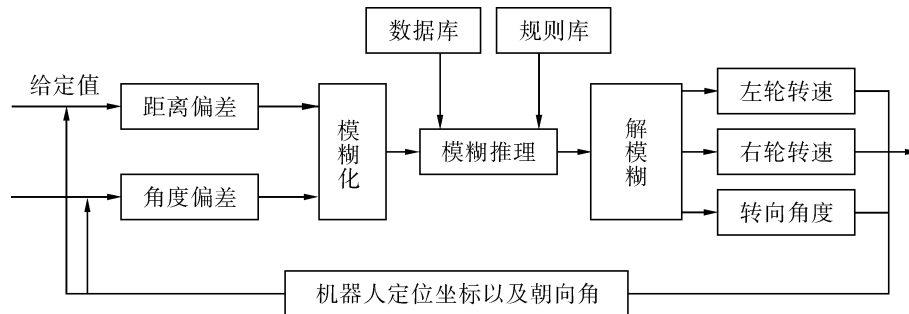


图4 机器人模糊控制流程

Fig.4 The flow chart of robot fuzzy control

控制器为两输入三输出的模糊控制器,将真实的确定量输入转换为一个模糊矢量.控制器实时接收机器人的定位坐标和航向角,并将其与给定的目标值比较,计算当前距离偏差量和航角偏差量.2个偏差量作为控制器输入先进行模糊化处理,得到输入的模糊矢量后,根据预先设定的数据库和规则库进行模糊推理,推理后得到的结果为模糊矢量,进行解模糊后作为控制量输出,输出量分别为左电机转速、右电机转速以及转向电机调节角度.2个输入中,机器人中心与道路中心线的距离偏差 $s$ 的论域为 $[-1.5, 1.5]$ ,划分为9个等级;机器人朝向与道路方向的角度偏差 $\Delta\varphi$ 的论域为 $[-15, 15]$ ,划分为5个等级.3个输出中,机器人左右2个电机的速度档

位 $u_1$ 和 $u_2$ 的论域为 $[0, 4]$ ,划分为5个等级;机器人转向角度 $u_3$ 的论域为 $[220, 500]$ ,划分为9个等级.以图5和图6为例,分别给出了基于Labview平台的 $s$ 和 $u_3$ 的隶属度函数图形.

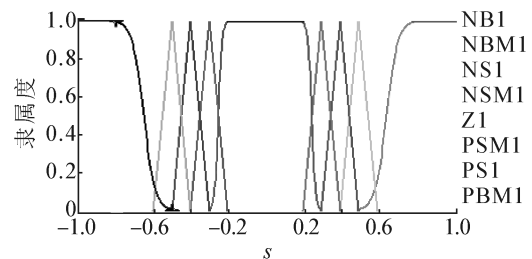


图5 距离偏移量 $s$ 的隶属度函数

Fig.5 Membership functions of distance offset  $s$



为了得到合理的输出控制量,要求模糊计算方法能够很好地表达输出隶属度函数的计算结果.采用加权平均法,将论域中的每个元素  $x_i (i=1,2,\dots,n)$  作为待判决输出模糊集合的隶属度  $u_i$  的加权系数,求得乘积  $x_i u_i$ ,再计算该乘积和  $\sum_{i=1}^n x_i u_i$  对于隶属度和的平均值  $x_0$ ,将其作为求得的判决结果.最后,将输出量化因子乘以  $x_0$  得到所需要的控制量.

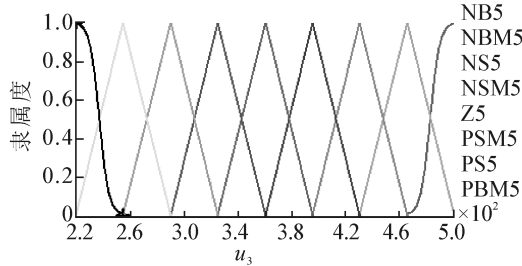


图6 转向角度输出  $u_3$  的隶属度函数

Fig.6 Membership function of steering angle output  $u_3$

### 3 变电站机器人现场导航轨迹波形分析及验证

本节对基于卡尔曼滤波与模糊控制的 DR/LMS 组合导航定位系统的机器人现场自主巡检过程进行了轨迹跟踪与数据反馈.通过对全局路径下一个周期路径定位数据的采集及波形分析,定量地验证了本导航及控制系统的动态稳定性和高精度性.

图7给出了500 kV变电站现场路径中的一段周期性路径,图中U形段为已知巡检路段,道路两侧的方框标识为视觉域内的参考点或自由空间点,其中参考点的地理坐标已知,坐标系如图7所示.理想的机器人行走轨迹应该是围绕中心路径(图7中虚线)的U形运动.

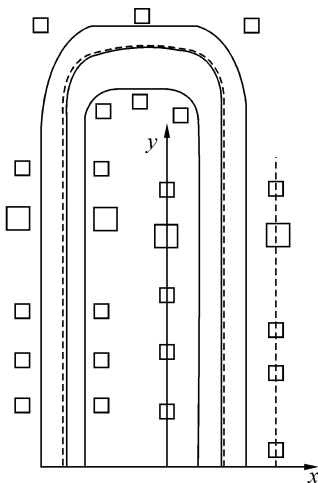


图7 自主巡检机器人现场理想轨迹模拟

Fig.7 Field track simulation of the independent inspection robot

图8定量地给出了不同滤波策略下本组合导航系统X坐标定位值的精度变化曲线,给定道路中心线的直线方程约束条件为  $X=3.3$  m.从图8中可以明显地看出,与X值理想定位变化趋势相比,经过卡尔曼滤波后的定位波形具有更高的精度与可信度.经现场试验,引入卡尔曼滤波后,系统的定位精度更加逼近于机器人的实际行为轨迹,其定位精度可以达到10 cm左右,并且经过多级参数整定后的模糊控制系统控制策略更加科学严谨.整个系统的导航控制频率在5 Hz左右,其响应速度完全可以满足现场应用需求.

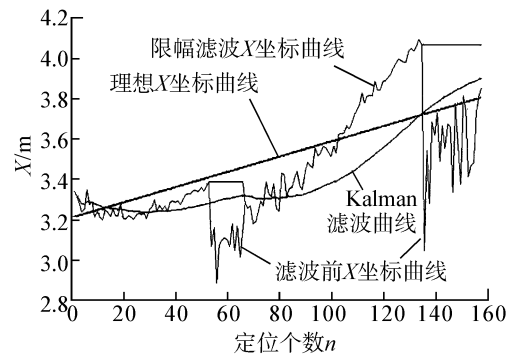


图8 定位X坐标滤波波形抽样分析

Fig.8 Sampling analysis on filtering wave of positioning X coordinate

图9定量地给出了机器人行为过程中本组合导航系统定位Y坐标的精度变化曲线.由于复杂工业环境对采样数据带来的噪声干扰,定位Y坐标在某些定位点会出现幅度较大的突变;而经限幅滤波、均值滤波等常用经典滤波方法有效地消除了外界噪声干扰.经过卡尔曼滤波后的Y坐标变化曲线的线性度与经典滤波波形曲线类似,区别仅仅在于一定程度上提高了系统定位精度与可靠性.而实际导航系统的控制量主要取决于X坐标的偏移量和导航角,为了简化控制策略及程序的复杂性、提高响应速度,对于Y坐标采用常用经典滤波的定位算法完全可以满足现场要求.

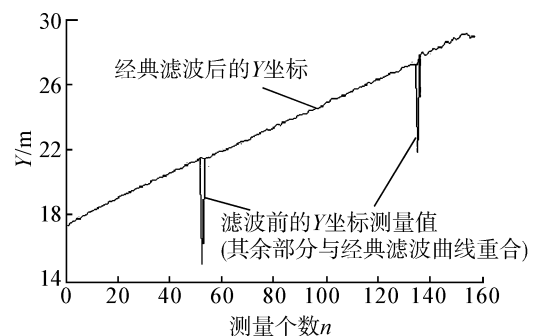


图9 定位Y坐标滤波波形抽样分析

Fig.9 Sampling analysis on filtering wave of positioning Y coordinate

图10 基于上位机控制系统 Labview 平台,定量、直观地给出了一个周期路径条件下,机器人直行段与转弯段的现场定位波形及导航轨迹(图中断点处是由于采集现场图像信息,未进行反馈数据的采集).对比中心线轨迹约束条件,即右侧直行段  $X = 3.4$  m、左侧直行段  $X = -27$  m、转弯段转弯半径  $R = 19$  m以及图7给出的现场模拟轨迹,可以看出,经卡尔曼滤波后的导航系统整体定位精度可以达到亚米级,且机器人导航轨迹与实际行为路径匹配度较高,完全可以达到自主巡检的任务要求.

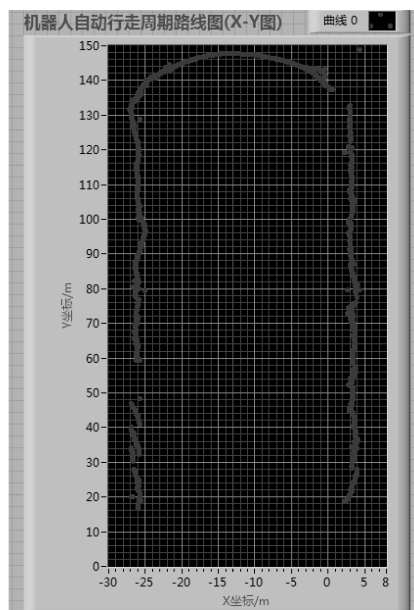


图10 机器人完整定位数据采集及全程轨迹跟踪

Fig.10 The positioning data acquisition and track following on the whole course

相应地,图11和12分别定量地给出了机器人直行段、转弯段的导航角实时采样数据及变化曲线.可以看出经过卡尔曼滤波后的导航角,即机器人行为轨迹与理想中心线的偏角大部分都保持在 $\pm 10^\circ$ 以内(左偏与右偏),效果非常理想.同时该动态航向角波形也进一步验证了模糊控制调节策略在本系统中的高动态精度,保证了机器人有效可靠的自主行为能力.

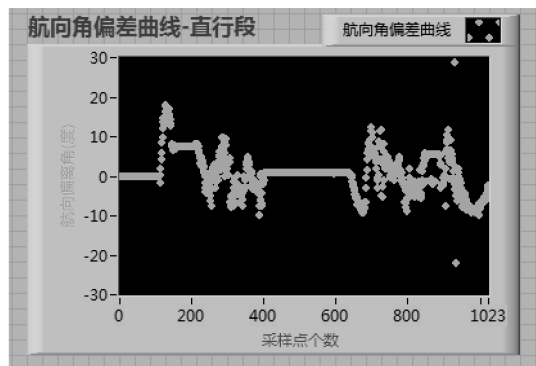


图11 机器人直行段导航偏离角在线跟踪

Fig.11 The online following of navigation angle when the robot is going straight

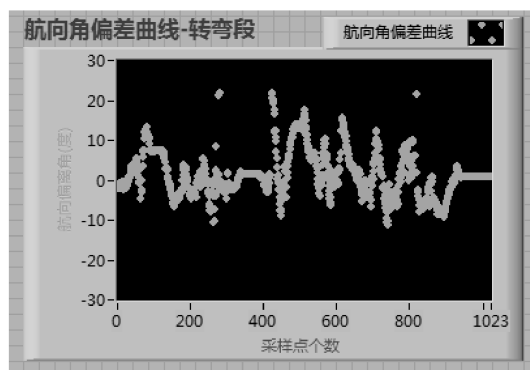


图12 机器人转弯段导航偏离角在线跟踪

Fig.12 The online following of navigation angle when the robot is turning

## 4 结束语

通过500 kV超高压变电站现场试验分析,相比其他导航系统,本系统在同样实现亚米级定位精度的同时,很大程度上降低了经济成本,适用性强,克服了电子罗盘等导航子系统易受变电站强电磁环境干扰的缺点.而基于模糊控制的机器人运动系统,能够更好地适应复杂多变的工业现场环境,减少了不同路径条件下导航误差的分散性,完全可以满足工业应用需求.因此,本系统的设计思想在实际智能变电站建设中具有广阔的应用价值与市场前景.此外,为了进一步提高本系统的稳定性,可以考虑在此基础上附加其他导航子系统作为反馈源,以适应更加复杂的工业现场条件.

## 参考文献:

- [1] 魏鹏,张志强,张春熹,等.无人值守变电站巡检机器人导航系统研究[J].自动化与仪表,2009(12):5-8,25.  
WEI Peng, ZHANG Zhiqiang, ZHANG Chunxi, et al. Design of the navigation system for the inspecting robot in the unattended operation substation[J]. Automation and Instrumentation, 2009(12):5-8,25.
- [2] 孟偲,王田苗.一种移动机器人全局最优路径规划算法[J].机器人,2008,27(3):217-222.  
MENG Si, WANG Tianmiao. A global optimal path planning algorithm for mobile robot[J]. Robot, 2008, 27(3):217-222.
- [3] 杨明,王宏,何克忠,等.基于激光雷达的移动机器人环境建模与避障[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(7):112-116.  
YANG Ming, WANG Hong, HE Kezhong, et al. The mobile robot environment modeling and obstacle avoidance based on laser radar[J]. Tsinghua Journal of Science and Technology: Science and Technology, 2000, 40(7):112-116.

- [4] 杨明,董斌,王宏,等.基于激光雷达的移动机器人实时位姿估计方法研究[J].自动化学报,2004,30(5):679-687.  
YANG Ming, DONG Bin, WANG Hong, et al. Research on laser rader based real-time pose estimation for mobile robots [J]. Acta Automatic Sinica, 2004, 30(5): 679-687.
- [5] 肖鹏,栾贻青,郭锐,等.变电站智能巡检机器人激光导航系统研究[J].自动化与仪表,2012(5):5-9.  
XIAO Peng, LUAN Yiqing, GUO Rui, et al. Research on laser navigation system for intelligent inspection robot in substation[J]. Automation and Instrumentation, 2012(5): 5-9.
- [6] 刘胤伯,刘大维,高军伟.基于EPOS的激光导航移动机器人运动控制研究[J].测控技术,2010,29(10):47-50.  
LIU Yinbo, LIU Dawei, GAO Junwei. Research on motion control for mobile robot of laser navigation of based on EPOS [J]. Measurement and Control Technology, 2010, 29(10): 47-50.
- [7] 付梦印,邓忠红,张继伟.Kalman滤波理论及其在导航系统中的应用[M].北京:科学出版社,2003.
- [8] PASSINO K M, YURKOVICH S. Fuzzy control[M]. Menlo Park, USA: Addison Wesley Longman, 2001: 21-72.
- [9] 汪洋,郭晨,孙富春,等.基于动态神经模糊算法的船舶航向自适应控制[J].哈尔滨工程大学学报,2009,30(10):1159-1164.  
WANG Yang, GUO Chen, SUN Fuchun, et al. Adaptive control of ship course using a dynamic neural fuzzy algorithm [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(10): 1159-1164.
- [10] 邓建球,李海军,胡松,等.基于特征模型和模糊动态特征模型自适应控制方法的网络控制系统[J].北京科技大学学报,2012,34(1):1-5.

DENG Jianqiu, LI Haijun, HU Song, et al. A kind of networked control system based on feature model and fuzzy dynamic feature model of adaptive control method[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2012, 34(1): 1-5.

- [11] 李大伟,贾鹏飞,李卫国,等.一种基于卡尔曼滤波的DR/LMS组合导航定位算法[J].自动化技术与应用,2012,31(9):17-23.

LI Dawei, JIA Pengfei, LI Weiguo, et al. An algorithm on DR/LMS integrated navigation and positioning system based on KALMAN filter[J]. Techniques of Automation and Applications, 2012, 31(9): 17-23.

#### 作者简介:



李大伟,男,1987年生,硕士研究生,主要研究方向为智能电网与电力系统新能源技术、电气设备在线监测与故障诊断。



贾鹏飞,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为新能源风电并网技术、电气设备在线监测与故障诊断。



李卫国,男,1954年生,教授,博士生导师,主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、移动机器人与电力设备检测等。