

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.054

# 农机车载 GPS 和 DR 组合导航系统定位方法\*

周建军<sup>1</sup> 王秀<sup>1</sup> 张睿<sup>1</sup> 刘刚<sup>2</sup> 马伟<sup>1</sup> 冯青春<sup>1</sup>

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**【摘要】** 为提高农机车载 GPS 和 DR 组合导航系统定位的精度,将模糊逻辑和卡尔曼滤波相结合,研究了模糊自适应卡尔曼滤波算法,在线修正系统量测噪声协方差阵。该算法在改装的农机车上进行了试验。试验表明,模糊自适应卡尔曼滤波能抑制异常值对系统定位精度的影响,定位精度较单个 GPS 高。系统使用模糊自适应卡尔曼滤波后, $x$  方向和  $y$  方向平均误差分别为 0.13 m 和 0.20 m,定位曲线得到了平滑。

**关键词:** 农机导航 全球定位系统 航位推算 定位 Kalman 滤波

**中图分类号:** S220.1; V249.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0262-04

## GPS/DR Integrated Navigation Positioning Method for Agricultural Machinery

Zhou Jianjun<sup>1</sup> Wang Xiu<sup>1</sup> Zhang Rui<sup>1</sup> Liu Gang<sup>2</sup> Ma Wei<sup>1</sup> Feng Qingchun<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

### Abstract

In order to improve positioning accuracy of GPS/DR integrated navigation, the fuzzy adaptive Kalman filter method was analyzed. Experiment was carried out on the modified agricultural machinery. Experiment results showed that the fuzzy adaptive Kalman filtering could inhibit the influence of unusual values on the localization precision of the system, and the system positioning accuracy of the proposed method was better than single GPS. The average positioning error of the  $x$  and  $y$  directions were 0.13 m and 0.20 m by using the fuzzy adaptive Kalman filter. Positioning curves was smoother after filter.

**Key words** Agricultural machinery navigation, GPS, Dead reckoning, Positioning, Kalman filter

### 引言

农机自动导航技术的应用有利于减少农作物生产投入成本,避免作业过程中产生衔接行的“重漏”,减少作业能耗、降低成本和增加经济效益<sup>[1]</sup>。要实现农业机械的自动导航,需解决两方面的问题,一是定位,二是控制。单一 GPS 导航、机器视觉导航或惯性导航,都因各种条件的限制存在一定的缺陷,难以提供连续、高质量的位置信息<sup>[2]</sup>。在此情况下,构建多传感器集成系统,将多源信息进行有效

融合,可为农机提供准确的位置信息。在组合导航系统中,卡尔曼滤波技术得到广泛应用<sup>[3-4]</sup>。在农机组合导航的实际应用中,由于传感器本身的原因,加上数据传递过程中可能出现的错误和树或建筑物等环境干扰,量测序列经常出现某些错误的、含有粗差的量测值。粗差的量测值带来的异常信息又将以线性组合的方式对滤波估值产生影响,致使滤波器的可靠性和收敛速度降低,甚至失去稳定性<sup>[5-6]</sup>。另外,由于常规卡尔曼滤波应用时,要求已知系统的精确数学模型和噪声统计特性,但在实际系统中模

收稿日期: 2012-07-07 修回日期: 2012-07-20

\* 国家自然科学基金资助项目(31101088)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A503)

作者简介: 周建军,助理研究员,博士,主要从事农业自动化装备研究,E-mail: zhoujj@nercita.org.cn

通讯作者: 王秀,研究员,博士,主要从事农业智能机具研究,E-mail: wangx@nercita.org.cn

型的不精确和噪声特性的不确定,使得卡尔曼滤波的结果不可能是最优的,估计精度也大大降低。为了解决这些问题,本文将卡尔曼滤波方法与模糊逻辑方法组合使用,根据实时得到的量测新息的实际方差与理论方差的比值,由设计的模糊推理系统在线实时调整量测噪声的权重,使滤波器在观测值发生异常的时候具有自适应能力。

## 1 模糊自适应卡尔曼滤波算法

### 1.1 常规卡尔曼滤波器设计

以改装的农机作为组合导航研究平台,进行 GPS 和 DR (dead reckoning) 组合导航定位方法研究。农机配有供电系统、自动转向机构、角度传感器以及定位传感器。GPS 选用 2 套,一套是美国 Trimble 公司的 AgGPS 332,使用 Trimble 5700 作为基站,差分后定位精度为 1~2 cm,可记录农机的真实位置,对组合定位精度进行测试。另一套是 AgGPS 132,定位精度是亚米级。DR 由陀螺仪和速度传感器组成。速度传感器选用 πW10L 型传感器。

农机农田作业时行进速度较慢且恒定,除了转弯外不会有大的转向动作,因此可以认为农机是恒速行驶<sup>[7]</sup>。设计卡尔曼滤波器之前假设:农机转向加速度为零。

对于一般的连续系统,对其进行离散处理后系统的基本状态方程和基本观测方程分别为<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

式中  $\mathbf{X}_k$ —— $k$  时刻的系统状态向量  
 $\mathbf{Z}_k$ —— $k$  时刻的系统量测向量  
 $\Phi_{k,k-1}$ —— $k-1$  时刻到  $k$  时刻的系统一步状态转移矩阵

$\mathbf{W}_{k-1}$ ——离散时间白噪声序列  
 $\mathbf{H}_k$ ——观测向量和状态向量之间的观测矩阵  
 $\mathbf{V}_k$ ——高斯白噪声序列

卡尔曼滤波算法可由下述方程描述:  
 一步预报方程

$$\mathbf{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} \quad (3)$$

状态递推方程

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k/k-1}) \quad (4)$$

增益方程

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k' (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k' + \mathbf{R})^{-1} \quad (5)$$

均方误差阵

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}' + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} \quad (7)$$

式中  $\mathbf{K}_k$ ——滤波器的增益

$\mathbf{Q}_k$ ——系统噪声的方差矩阵

$\mathbf{R}$ ——量测噪声的方差

$\mathbf{P}_k$ —— $k$  时刻系统对象的状态估计误差协方差

依据卡尔曼滤波器的基本状态转移方程,定义系统状态向量  $\mathbf{X}_k = [x(k) \quad y(k) \quad v(k)]$ , 其中  $x(k)$ 、 $y(k)$  为 WGS84 坐标系下高斯投影直角坐标系下的  $x$ 、 $y$  坐标,  $v(k)$  为农机纵向的行进速度。设  $T$  为采样周期,忽略在采样周期  $T$  内农机航向角度变化的影响,航位推算的递推关系式可表示为

$$x_k = x_{k-1} + vT \cos \theta_{k-1}$$

$$y_k = y_{k-1} + vT \sin \theta_{k-1}$$

基于上述农机航位推算的简单递推关系式,可建立基于常速度模型的定常线性系统的卡尔曼滤波器数学模型。这样常规卡尔曼滤波器的状态转移矩阵可定义为

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T \cos(\theta(k-1)) \\ 0 & 1 & T \sin(\theta(k-1)) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $\theta(k)$ ——农机车身前进方向在高斯投影平面坐标下的角度分量,横轴正向为零,逆时针为正

### 1.2 模糊卡尔曼滤波器设计

定义残差为  $\mathbf{S}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k/k-1}$ 。在理想的状态下,残差序列  $\{\mathbf{S}_k\}$  的均值为零,它的方差的实测值与经过卡尔曼滤波得到的方差的理论值应该是相等的,也即它们的比值应该是 1,或者接近于 1<sup>[8]</sup>。如果按照常规卡尔曼滤波,量测噪声的方差从始至终都使用初始计算时的先验值,就会造成滤波结果不准确,甚至发散。为了在农机运动过程中能比较准确地得到滤波计算值,可在线实时调整量测噪声的方差,即

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k' (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k' + \mathbf{R}_{k-1})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_k = T_k \mathbf{R}_{k-1} \quad (10)$$

与传统卡尔曼滤波算法相比,不同之处是基于模糊控制的卡尔曼滤波算法在测量的噪声方差计算式中乘了一个模糊控制器的系统输出  $T_k$ ,通过改变  $T_k$  可以调整滤波器的增益<sup>[7-8]</sup>。每进行一次滤波,就在线调整一次量测噪声方差,这样就把上述的常规卡尔曼滤波变成了在线实时调整量测噪声方差的模糊卡尔曼滤波算法。

### 1.3 模糊推理系统设计

定义残差的理论方差阵为  $\mathbf{L}_k$ , 则

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{H}_k (\Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}' + \mathbf{Q}) \mathbf{H}_k' + \mathbf{R}_{k-1} \quad (11)$$

定义残差的测量方差阵为  $\mathbf{J}_k$ , 则

$$\mathbf{J}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=i-M+1}^i \mathbf{S}_k \mathbf{S}_k' \quad (12)$$

式(12)中,  $J_k$  为最新的  $M$  个残差向量方差的平均值。 $M$  由经验根据具体情况选定, 平均主要起平滑作用。定义  $C_k$  为残差的实测方差与残差的理论方差的比值, 则

$$C_k = \frac{\text{tr}(J_k)}{\text{tr}(L_k)} \quad (13)$$

式中  $\text{tr}()$  表示对矩阵求迹。

由式(11)和(13)可见, 增加  $R_k$  会使  $C_k$  减小, 减少  $R_k$  使  $C_k$  增大。正常情况下  $C_k$  在 1 附近。模糊推理系统(FIS)采用单输入单输出模式, 将残差的实测方差与残差的理论方差的比值  $C_k$  作为模糊推理系统的输入, 得到系统输出  $T_k$ 。两者的隶属度函数分别为 2 个三角形隶属度函数和一个梯形隶属度函数。 $T_k$  的隶属度函数曲线如图 1 所示。采用一个梯形隶属度函数的目的就是为了避免  $C_k$  在近似等于 1 的情况下, 仍然调整  $T_k$  而引起不必要的滤波误差。

定义模糊规则如下

If  $C_k \in \text{less } 0.9$ , then  $T_k \in \text{less } 1$

If  $C_k \in \text{more } 0.9$  and  $C_k \text{ less } 1.1$ , then  $T_k \in \text{equal } 1$

If  $C_k \in \text{more } 1.1$ , then  $T_k \in \text{more } 1$

$C_k$  小于 0.9 时, 说明残差的实测方差小于理论方差, 说明测量精度比较高。模糊输出的求解, 采用模糊推理系统直接输出, 这样每滤波 1 次模糊逻辑系统输出一个  $T_k$ , 对量测噪声的协方差阵在线调整 1 次。

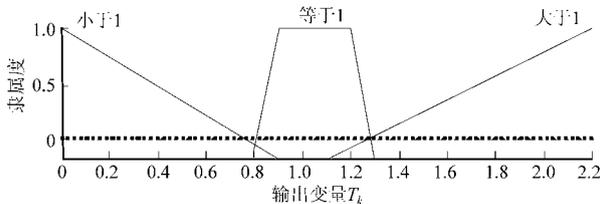


图 1  $T_k$  的隶属度函数

Fig. 1  $T_k$  membership functions

### 1.4 基于模糊自适应卡尔曼滤波的组合导航系统

采用输出校正的 GPS 和 DR 组合导航系统易于工程实现, 且滤波故障不会影响 GPS 与 DR。基于模糊自适应卡尔曼滤波的组合导航系统结构如图 2 所示。模糊推理系统根据模糊规则由  $C_k$  得到调整系数  $T_k$ , 再通过  $T_k$  调整自适应卡尔曼滤波器得到最优状态。

## 2 试验与分析

原始数据采集通过组合定位试验系统安置在改装的农机上, 人工驾驶农机以恒定的速度在预定的路径上行驶, 并由软件记录各种传感器数据。为了检验该滤波器在曲线行走时的定位精度, 本研究对

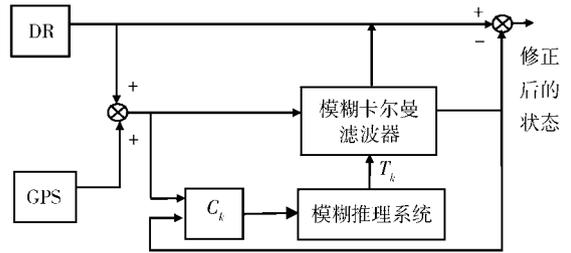


图 2 模糊自适应卡尔曼滤波器系统结构简图

Fig. 2 Structure diagram of fuzzy adaptive Kalman filter system

试验场地的一条曲线进行了多次数据采集并记录了如下数据:  $x$  坐标、 $y$  坐标、航向角度、速度、前轮转角、采样时间以及滤波后的数据。

滤波器的初始条件为

$$P(0) = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 0.1 & \\ & & & 0.1 \end{bmatrix} \quad R(0) = \begin{bmatrix} 0.1 & & & \\ & 0.1 & & \\ & & & 0.01 \\ & & & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$Q(0) = \begin{bmatrix} 0.1 & & & \\ & 0.1 & & \\ & & & 0.1 \\ & & & 0.1 \end{bmatrix}$$

试验场地是一段弯道, 人工驾驶农机以匀速沿导航线行进, 并实时保存采集的位置信息和姿态数据。以厘米级 AgGPS 332 采集农机的实时位置作为参考的真值, 使用亚米级 AgGPS 132 和速度传感器、陀螺仪组成的 DR 系统通过模糊自适应 Kalman 滤波实现数据融合来提高定位精度。

起点坐标为 (444 915.069 9, 4 430 076.428 1), 为了便于分析计算, AgGPS 132 和 AgGPS 332 采集的坐标数据都减去起点坐标, 使用相对坐标。滤波结果如图 3 所示。使用模糊自适应 Kalman 滤波方法对 AgGPS 132 和 DR 进行融合后, 农机位置的平均值、极差和标准差滤波前后数据比较如表 1 所示。从图 3 可知, 在 (-20, 30) 处测量值出现了大的偏差时, 经典(传统) Kalman 滤波数据也出现了大的偏差, 而模糊自适应卡尔曼滤波数据没有出现大的偏

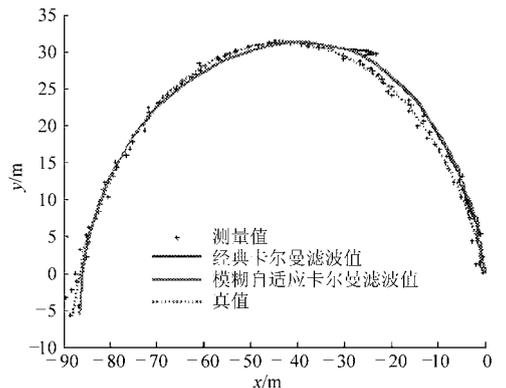


图 3 曲线路径卡尔曼滤波结果

Fig. 3 Results of curve path Kalman filter

差,对异常值有自适应能力,使用模糊自适应卡尔曼滤波后  $x$  方向和  $y$  方向平均误差分别为 0.13 m、0.20 m,最大误差分别为 0.51 m 和 0.54 m。

表 1 模糊卡尔曼滤波前、后的误差统计  
Tab.1 Statistical results before and after filter

		$x$ 坐标/m	$y$ 坐标/m
滤波前	最大值	0.76	0.75
	平均值	0.20	0.30
	方差	0.08	0.10
滤波后	最大值	0.51	0.54
	平均值	0.13	0.20
	方差	0.03	0.05

### 3 结束语

针对农机车载 GPS 和 DR 组合导航系统实际应用,研究了一种基于模糊推理自适应卡尔曼滤波的组合导航算法。该算法在改装的农机试验平台上进行了应用。应用中使用 RTK DGPS、RTD GPS 和陀螺仪分别采集农机的位置信息和姿态信息。采用模糊卡尔曼滤波对 RTD GPS 和陀螺仪、速度传感器的数据进行了融合,并使用 RTK DGPS 作为真值参考值进行了试验验证。融合后精度较单独使用 RTD GPS 定位精度有所提高, $x$  方向和  $y$  方向平均误差分别为 0.13 m 和 0.20 m。试验表明基于模糊推理自适应卡尔曼滤波的组合导航算法是有效的。

### 参 考 文 献

- 李建平,林妙玲.自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J].农业工程学报,2006,22(9):232~234.  
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9):232~234. (in Chinese)
- 陈艳,张漫,马文强,等.基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J].农业工程学报,2011,27(3):126~130.  
Chen Yan, Zhang Man, Ma Wenqiang, et al. Positioning method of integrated navigation based on GPS and machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 126~130. (in Chinese)
- 张国良,曾静.组合导航原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,2008.
- 周俊,姬长英.自主车辆导航系统中的多传感器融合技术[J].农业机械学报,2002,33(5):113~116.  
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5):113~116. (in Chinese)
- 沈云锋,马林立.基于模糊控制的舰船组合导航 Kalman 滤波器[J].系统工程与电子技术,2002,24(5):23~24.  
Shen Yunfeng, Ma Linli. Vessel composite navigation Kalman filter based on fuzzy control[J]. Systems Engineering and Electronics,2002,24(5):23~24. (in Chinese)
- Farrell J A, Givargis T D, Barth M J. Differential carrier phase GPS-aided INS for automotive applications[C]//Proceedings of the 1999 American Control Conference, 1998,5: 3 660~3 664.
- Price R R, Goutam Nistala. Development of an inexpensive autonomous guidance system[C]//ASAE Annual Meeting, Paper No.051139, 2005.
- Guo Linsong. Develop of a low-cost navigation system for autonomous off-road vehicles [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.

(上接第 226 页)

- 王全喜,杨世昆,刘贵林,等.热泵辅助型太阳能储热干燥设备:中国,ZL201020114147.0[P].2010-11-24.
- 王全喜,包德胜,贺刚,等.太阳能相变储热器:中国,ZL201020114134.3[P].2010-12-01.
- 王全喜,刘贵林.新型太阳能牧草种子干燥设备设计[C].2010 国际农业工程大会论文集,上海,2010.  
Wang Quanxi, Liu Guilin. Design on new type of grass-seed solar energy drying[C]. Proceedings of International Agricultural Engineering Conference 2010, Shanghai, 2010. (in Chinese)
- Caneta Research Inc. Commercial/institutional ground-source heat pump engineering manual[M]. ASHRAE, Atlanta,1995.
- Kavanaugh Stephen P, Lambert Steven E. A bin method energy analysis for ground-coupled heat pumps [J]. ASHRAE Transactions,2004(1):535~542.
- GB/T 6970—2007 粮食干燥机试验方法[S]. 2007.
- 王全喜,翟改霞.太阳能牧草种子干燥的关键技术[C].2010 国际农业工程大会,上海,2010.  
Wang Quanxi, Zhai Gaixia. Key technique of grass-seed drying by solar energy [C]. Proceedings of International Agricultural Engineering Conference 2010, Shanghai, 2010. (in Chinese)