

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.019

一种惯性传感器与编码器相结合的 AGV 航迹推算系统*

吴 鹏 , 李东京* , 袁 超

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘要: 针对在没有外部信号的室内环境下的自动导引车定位问题, 对如何提高相对定位算法的准确性与稳定性等问题进行了研究, 提出了一种将惯性导航与里程计相结合的算法, 设计了卡尔曼滤波器来将磁强计、陀螺仪、加速度计的数据与轮上编码器的数据相融合, 搭建了以 Windows XP 为操作系统, 固高嵌入式运动控制器为主控的两轮驱动实验平台, 并基于该实验平台设计了传感器误差补偿对比实验与位置估计对比实验。实验结果表明: 所提出的算法对补偿加速度计与陀螺仪的传感器误差, 提升位置估计的准确性与稳定性具有显著效果。

关键词: 定位; 航迹推算; 惯性导航; 自动导航车; 编码器

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)03-0310-07

Dead reckoning localization system for AGV using inertial sensors and wheel revolution encoding

WU Peng , LI Dong-jing , YUN Chao

(School of Mechanical Engineering and Automation , Beihang University , Beijing 100191 , China)

Abstract: Aiming at the problem of automatic guided vehicle positioning without external signal in indoor environments, the accuracy and stability of the relative positioning algorithm were studied, and an algorithm to combine inertial navigation system and odometry was proposed. In order to achieve optimal solutions, a Kalman filter that base on the data of magnetometer, gyroscope, accelerometer and data of wheel encoder was designed. A two-wheel drive experimental platform with Windows XP and GT motion controller was set up. And based on the experimental platform, sensor error compensation comparison experiment and position estimation comparison experiment were designed. The results of the comparison experiment indicate that the algorithm has significant effect on compensating the sensor error and improving the accuracy and stability of the position estimation.

Key words: localization; dead reckoning; inertial navigation system(INS); automated guided vehicles(AGV); encoder

0 引 言

自动导航车 AGV 是一种自动化无人驾驶的智能化搬运设备, 是现代工业自动化物流系统中的关键设备^[1-2]。其定位系统是实现自动导引的关键部分,

也是目前的研究热点。定位是指 AGV 通过感知自身和周围环境信息, 经过一定的数据处理得到自身位姿的过程。目前主要分为两类: 绝对定位和相对定位^[3]。

常用的绝对定位方式有全球定位系统(GPS)、超

收稿日期: 2017-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305008)

作者简介: 吴 鹏(1991-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事移动机器人定位导航方面的研究。E-mail: wupeng2018@buaa.edu.cn

通信联系人: 李东京, 男, 博士, 讲师。E-mail: ltokyo@126.com

声波定位系统、红外网络系统、射频识别系统等等^[4]。其中GPS不能用在室内,并且更新频率较低^[5];超声波定位系统和红外网络系统具有低成本、小型化和易于连接的特点^[6],然而这两种方法不能在长距离下使用,同时需要在场景中大面积布置,并且由于信号干扰而难以满足AGV的定位要求^[7];而射频识别系统需要额外的设备和较高的成本^[8]。这些绝对定位方法的优点在于它们不会积累定位误差,但整体定位误差较大^[9]。

相对定位主要是指惯性导航和里程计算法(或测距法)^[10]。惯性导航使用的主要传感器为IMU或AHRS,包括三轴的磁强计、三轴的陀螺仪和三轴的加速度计^[11]。静止状态下,通过磁强计与加速度计获取姿态;运动状态下,通过加速度计获取位置,通过陀螺仪获取姿态。里程计算法使用的主要传感器为轮上编码器。运动状态下,基于主动轮上编码器的脉冲计数来估计AGV的位姿^[12]。这两种相对定位方式都由于算法中引入了一次或二次积分而存在较大累积误差,单独使用时都很难保证AGV定位的准确性和稳定性^[13]。

针对该问题,多数的研究采用将惯性导航与绝对定位相结合或里程计算法与绝对定位相结合的方式消除累积误差。例如LUM F、LIU B C等人^[14]将红外网络系统与里程计算法相结合;HELLMERS H、NORRDINE A等人^[15]将超声波定位系统与惯性导航相结合;张永泽、艾长胜等人^[16]将惯性导航与视觉相结合。但是这些研究都主要集中在使用外部信号来消除相对定位的累积误差上,并没有实质上减少里程计算法或者惯性导航算法本身所引入的累积误差。

本文将提出将惯性导航与里程计算法这两种相对定位算法相结合的方式,并搭建相应的实验平台对算法的有效性进行验证。

1 惯性导航

1.1 初始对准算法

惯性导航基于初始位置和初始姿态来计算AGV的相对位姿^[17]。假设以起始点为原点,AGV的初始的姿态可以由相互正交的三轴加速度计和磁强计计算得出。

首先求出载体坐标系上的加速度向量:

$$\mathbf{f}^b = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^n = \mathbf{C}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g^n \sin\theta \\ -g^n \cos\theta \sin\phi \\ -g^n \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{C}_n^b —由导航坐标系到载体坐标系的旋转矩阵; \mathbf{f}^b —在载体坐标系上的加速度向量; g^n —在导航坐标系中的重力加速度; ϕ —横滚角; θ —俯仰角。

根据几何关系 ϕ θ 可由下面两式算出:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-g^n \cos\theta \sin\phi}{-g^n \cos\theta \cos\phi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{f_y}{f_z} \right) \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{g^n \sin\theta}{g^n \cos\theta} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} \right) \quad (3)$$

磁强计可以测量地球磁场在该地区的磁场强度在载体坐标系中的三轴分量,根据磁场强度可以计算得到偏航角 φ 。

地磁示意图如图1所示。

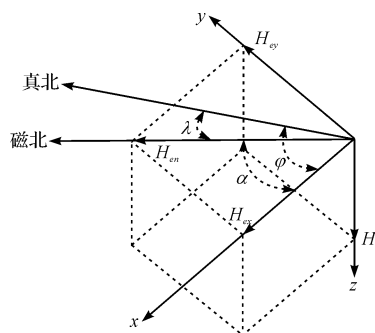


图1 地磁示意图

磁北角 α 由几何关系算出:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H_{ey}}{H_{ex}} \right) \quad (4)$$

磁北和真北的差角为磁偏角 λ , 则偏航角为:

$$\varphi = \lambda + \alpha \quad (5)$$

1.2 误差校准算法

当AGV运动时,可由三轴陀螺仪获取车身角速度在载体坐标系中的三轴分量,进而积分算得车身的姿态。同时,载体坐标系的速度和位置可分别由加速度的一次、二次积分算得。但是,该积分运算会使两传感器的误差随时间而累积,进而极大地影响速度和位姿的准确度。因此在将加速度计和陀螺仪用于AGV的定位时,必须通过校准和补偿来提高精度。

首先,可以由式(2-3)分别求得横滚角、俯仰角和偏航角,再进一步计算得到载体坐标系到导航坐标系的旋转矩阵 \mathbf{C}_b^n :

$$C_b^n = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & c\varphi s\theta s\phi - s\varphi c\phi & c\varphi s\theta c\phi + s\varphi s\phi \\ s\varphi c\theta & s\varphi s\theta s\phi + c\varphi c\phi & s\varphi s\theta c\phi - c\varphi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

在静止状态下,加速度计所测得的加速度都来自于重力加速度,因此其在导航坐标系中的北向和东向的分量都为 0,即这两个方向的测量值都是噪声:

$$\mathbf{f}^n = \begin{bmatrix} f_{N_{\text{measure}}} \\ f_{E_{\text{measure}}} \\ f_{D_{\text{measure}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{N_{\text{bias}}} \\ f_{E_{\text{bias}}} \\ -g^n + f_{D_{\text{bias}}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_{\text{bias}}^n = \begin{bmatrix} f_{N_{\text{bias}}} \\ f_{E_{\text{bias}}} \\ f_{D_{\text{bias}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{N_{\text{measure}}} \\ f_{E_{\text{measure}}} \\ f_{D_{\text{measure}}} + g^n \end{bmatrix} \quad (8)$$

求出加速度计噪声后,便可通过将其移除来获取估计值:

$$\hat{\mathbf{f}}^n = \mathbf{f}^n - \mathbf{f}_{\text{bias}}^n \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{f}}^n$ — 移除噪声后的加速度在导航坐标系中的表示。

通过旋转矩阵将其表示在载体坐标系中:

$$\mathbf{f}_{\text{bias}}^b = C_b^n \mathbf{f}_{\text{bias}}^n \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{f}}^b = \mathbf{f}^b - \mathbf{f}_{\text{bias}}^b \quad (11)$$

式中: $\hat{\mathbf{f}}^b$ — 移除噪声的加速度在载体坐标系中的表示。

三轴陀螺仪提供角速度在载体坐标系中的三轴分量。当 AGV 静止时,陀螺仪在载体坐标系中的三轴分量应当都为 0,因此此时的读数都是噪声:

$$\boldsymbol{\omega}^b = \boldsymbol{\omega}_{\text{bias}}^b = [\omega_{x_{\text{bias}}} \quad \omega_{y_{\text{bias}}} \quad \omega_{z_{\text{bias}}}]^T \quad (12)$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}^b = \boldsymbol{\omega}^b - \boldsymbol{\omega}_{\text{bias}}^b \quad (13)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{\omega}}^b$ — 移除噪声的角速度在载体坐标系中的表示。

1.3 位置算法

速度和位置可分别由加速度的一次和二次积分算得:

$$\mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{v}_k + \mathbf{f}_k \Delta t \quad \mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \mathbf{v}_k \Delta t \quad (14)$$

代入加速度可得:

$$\mathbf{v}_{k+1}^n = \mathbf{v}_k^n + (\mathbf{C}_b^n \hat{\mathbf{f}}_k^b + \mathbf{g}^n) \Delta t$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^n = \mathbf{P}_k^n + \mathbf{v}_k^n \Delta t + \frac{1}{2} (\mathbf{C}_b^n \hat{\mathbf{f}}_k^b + \mathbf{g}^n) \Delta t^2 \quad (15)$$

式中: \mathbf{v}_{k+1}^n — 时刻 k 的速度在导航坐标系中的表示 $\mathbf{v}_{k+1}^n = [v_{N_k} \quad v_{E_k} \quad v_{D_k}]^T$; \mathbf{P}_k^n — 时刻 k 的位置向量在导航坐标系中的表示 $\mathbf{P}_k^n = [P_{N_k} \quad P_{E_k} \quad P_{D_k}]^T$ 。

2 里程计算法

里程计算法使用的主要传感器为轮上编码器。运动状态下,基于主动轮上编码器的脉冲计数来估计 AGV 的位姿。

记编码器转一周产生的脉冲数为 N ,记测得的脉冲计数为 M 则有:

$$\eta_{k_l} = \frac{M_l}{N} \times 2\pi \quad \eta_{k_r} = \frac{M_r}{N} \times 2\pi \quad (16)$$

式中: η_{k_l} η_{k_r} — 左右两轮的转角,以弧度为单位; M_l , M_r — 两轮上编码器所测得的脉冲数。

里程计算法示意图如图 2 所示。

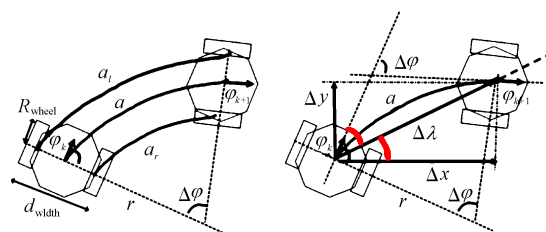


图 2 里程计算法示意图

AGV 的速度、位置和偏航角都可以基于两轮的转角 η_{k_l} 和 η_{k_r} 来计算。AGV 的行驶距离 a_k 可以用驱动轮的半径 R_{wheel} 和轮子的转角来表示:

$$a_{k_l} = R_{\text{wheel}} \eta_{k_l} \quad a_{k_r} = R_{\text{wheel}} \eta_{k_r} \quad (17)$$

$$a_k = \frac{a_{k_l} + a_{k_r}}{2} \quad (18)$$

AGV 的偏航角变化量 $\Delta\varphi_k$,可以由 AGV 两驱动轮的间距和每个轮子的行驶距离来计算:

$$\Delta\varphi_k = \frac{a_{k_l} - a_{k_r}}{d_{\text{width}}} \quad (19)$$

进而可以算得 AGV 车身的转动半径 r_k :

$$r_k = \frac{a_k}{\Delta\varphi_k} \quad (20)$$

由余弦定理,AGV 的位置变化量可以表示为:

$$\Delta\lambda_k^2 = r_k^2 + r_k^2 - 2r_k^2 \cos\Delta\varphi_k = 2(1 - \cos\Delta\varphi_k) r_k^2 \quad (21)$$

当 AGV 作直线运动时,车身的偏航角变化量为 0,此时计算得到的车身转动半径无穷大,上式中括号项为 0,进而 AGV 的位置变化量为 0,显然是不正确的。故单独处理这种情况,使用泰勒级数将式(21)展开:

$$\Delta\lambda_k^2 = 2 \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta\varphi_k^2}{2!} + \frac{\Delta\varphi_k^4}{4!} - \frac{\Delta\varphi_k^6}{6!} + \dots \right) \right] \frac{a_k^2}{\Delta\varphi_k^2} =$$

$$2a_k^2 \left(\frac{1}{2!} - \frac{\Delta\varphi_k^2}{4!} + \frac{\Delta\varphi_k^4}{6!} - \frac{\Delta\varphi_k^6}{8!} + \dots \right) \quad (22)$$

进而计算 AGV 在导航坐标系中的位置变化:

$$\begin{aligned}\Delta P_{N_k} &= \Delta \lambda_k \cos\left(\varphi_{k-1} + \frac{\Delta \varphi_k}{2}\right) \\ \Delta P_{E_k} &= \Delta \lambda_k \sin\left(\varphi_{k-1} + \frac{\Delta \varphi_k}{2}\right)\end{aligned}\quad (23)$$

由于行驶地面不可能绝对水平,笔者考虑AGV轻微的横滚和俯仰,将位置变化量投影到水平面,则可以进一步表示为:

$$\begin{aligned}\Delta \hat{P}_{N_k} &= \Delta P_{N_k} \cos \theta + \Delta P_{E_k} \sin \theta \cos \theta \\ \Delta \hat{P}_{E_k} &= \Delta P_{E_k} \cos \phi\end{aligned}\quad (24)$$

AGV在 $k+1$ 时刻的位置和偏航角可以表示为:

$$P_{N_{k+1}} = P_{N_k} + \Delta \hat{P}_{N_k}, P_{E_{k+1}} = P_{E_k} + \Delta \hat{P}_{E_k} \quad (25)$$

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta \varphi_k \quad (26)$$

速度则可以通过求微分得到:

$$v_{N_k} = \frac{\Delta \hat{P}_{N_k}}{\Delta t}, v_{E_k} = \frac{\Delta \hat{P}_{E_k}}{\Delta t} \quad (27)$$

3 卡尔曼滤波器

本文将惯性导航和测距法相结合。采用KF对编码器和惯性传感器的数据进行融合。线性随机差分方程为:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (28)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (29)$$

式中: \mathbf{x}_k —在时刻 k 的状态变量,分别是速度、姿态和偏航角变化量 $\mathbf{x}_k = [v_{N_k}^n \ v_{E_k}^n \ \phi_k \ \theta_k \ \varphi_k \ \Delta \varphi_k]^T$ 。

随机变量 \mathbf{w}_k 和 \mathbf{v}_k 分别表示过程噪声和测量噪声。相应的时间更新方程和测量更新方程^[18]为:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{k-1} \quad (30)$$

$$\mathbf{K}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{K}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (31)$$

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{K}_k^- \mathbf{H} (\mathbf{H} \mathbf{K}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (32)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{G}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (33)$$

$$\mathbf{K}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \mathbf{H}) \mathbf{K}_k^- \quad (34)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_k$ —后验状态估计量; $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ —先验状态估计量; \mathbf{K}_k —后验误差协方差; \mathbf{K}_k^- —先验误差协方差; \mathbf{G}_k —卡尔曼增益。

由于先验估计和后验估计是线性关系,并假设速度和姿态的相关系数为0,则 \mathbf{A} 是单位矩阵。

输入变量(加速度、角速度)和状态变量只与测量的时间间隔和转换矩阵有关,故有:

$$\mathbf{u} = [f_{N_k}^n \ f_{E_k}^n \ \omega_{x_k}^b \ \omega_{y_k}^b \ \omega_{z_k}^b \ \omega_{z_k}^b]^T \quad (35)$$

$$\mathbf{B} = \Delta t \times \mathbf{I}_{6 \times 6} \quad (36)$$

其中 $[f_{N_k}^n \ f_{E_k}^n \ f_{D_k}^n]^T = \mathbf{C}_b^n [f_{x_k}^b \ f_{y_k}^b \ f_{z_k}^b]^T$ 。

测量量和状态量是线性关系,但测量量彼此之间不相关,则有:

$$\begin{aligned}\mathbf{H} &= \mathbf{I}_{6 \times 6} \\ \mathbf{Z}_k &= [v_{N_k}|_o \ v_{E_k}|_o \ \phi_k|_a \ \theta_k|_a \ \varphi_k|_c \ \Delta \varphi_k|_o]^T = \\ &\quad \mathbf{H} \mathbf{x}_k\end{aligned}\quad (37)$$

式中:下标 o —由里程计算法计算所得;下标 a —由公式(23)计算所得;下标 c —由磁强计计算所得。

其中,过程噪声协方差来自惯性传感器的测量过程,假设惯性传感器彼此之间不相关,则有:

$$\mathbf{Q}_v = \mathbf{E}[\mathbf{N}_v^2] = \mathbf{E}[\mathbf{N}_f^2 \Delta t^2] = \mathbf{Q}_f \Delta t^2 \quad (38)$$

式中: \mathbf{Q}_f —加速度的噪声协方差。

姿态的协方差是陀螺仪输出的一次积分:

$$\mathbf{Q}_{\text{angle}} = \mathbf{E}[\mathbf{N}_{\text{angle}}^2] = \mathbf{E}[\mathbf{N}_{\text{gyro}}^2 \Delta t^2] = \mathbf{Q}_{\text{gyro}} \Delta t^2 \quad (39)$$

式中: $\mathbf{N}_{\text{angle}}$ —陀螺仪的白噪声; \mathbf{Q}_{gyro} —陀螺仪的噪声协方差。

过程噪声协方差为:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{\Delta v_N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{\Delta v_E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{\Delta v_\phi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{\Delta v_\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{\Delta v_\varphi} & Q_{\Delta v_\varphi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{\Delta v_\varphi} & Q_{\Delta v_\varphi} \end{bmatrix} \quad (40)$$

式中: $Q_{f_N} \ Q_{f_E} \ Q_{f_D}$ —加速度计三轴分量的误差协方差; $Q_{\Delta v_N} = Q_{f_N} \Delta t^2$, $Q_{\Delta v_E} = Q_{f_E} \Delta t^2$, $Q_{\Delta v_\phi} = Q_{g_x} \Delta t^2$, $Q_{\Delta v_\theta} = Q_{g_y} \Delta t^2$, $Q_{\Delta v_\varphi} = Q_{g_z} \Delta t^2$, $[Q_{f_N} \ Q_{f_E} \ Q_{f_D}]^T = \mathbf{C}_b^n \cdot \mathbf{C}_b^n [Q_{f_x} \ Q_{f_y} \ Q_{f_z}]^T$; $Q_{g_N} \ Q_{g_E} \ Q_{g_D}$ —陀螺仪三轴分量的误差协方差;运算符 \cdot —Matlab里表示向量元素对应相乘的运算符。

测量的噪声协方差来自编码器和磁强计,同时假设加速度计和磁强计以及编码器不相关,则有:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{v_N} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{v_E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\Delta \varphi} \end{bmatrix} \quad (41)$$

式中: $R_{v_N} \ R_{v_E} \ R_{\Delta \varphi}$ —由编码器估计的速度、偏航角变化量的误差协方差; $R_\phi \ R_\theta$ —来自加速度计的误差协方差; R_φ —来自磁强计的误差协方差。

算法流程图如图3所示。

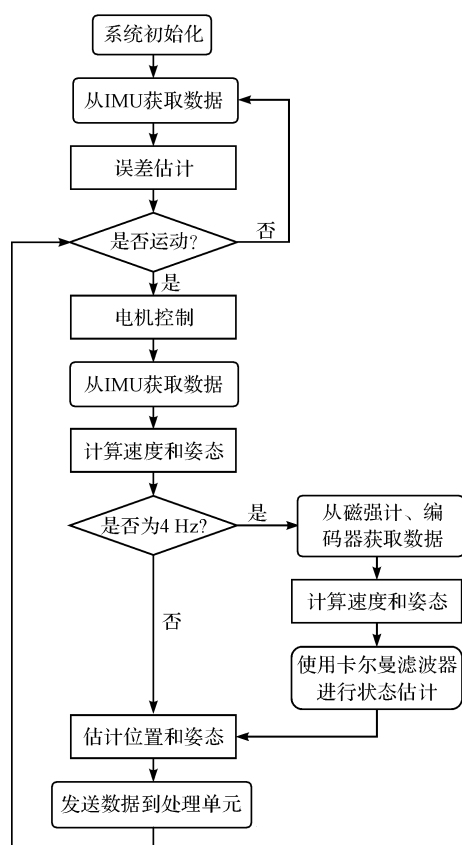


图 3 算法流程图

4 实验

为了验证算法的有效性,本研究搭建了两轮驱动实验平台。其中,编码器安装在两驱动轮上,IMU传感器选用的是 Advanced navigation 公司的 Orientus 产品。

4.1 误差补偿实验

为验证误差补偿算法的有效性,本研究设计了误差补偿的对比实验。实验对加速度计在静止状态下的输出值采样 10 s,然后取均值,将该值作为加速度在载体坐标系中的测量值 f^b ,最后根据式(11)计算移除噪声后的加速度 \hat{f}^b 。本研究截取补偿前后的 3 600 s 数据进行绘图, x 分量和 z 分量的补偿效果明显, y 分量也实现了较大程度的补偿。

结果如图 4 所示。

类似地,本研究使用 200 个样本的平均值计算陀螺仪的偏差值 ω_{bias}^b ,再据式(13)计算移除噪声后的角速度值 $\hat{\omega}^b$ 。对陀螺仪的误差补偿前后所采集数据的绘图结果如图 5 所示。

补偿后的角速度几乎为 0,并且状态稳定,达到了非常好的补偿效果。

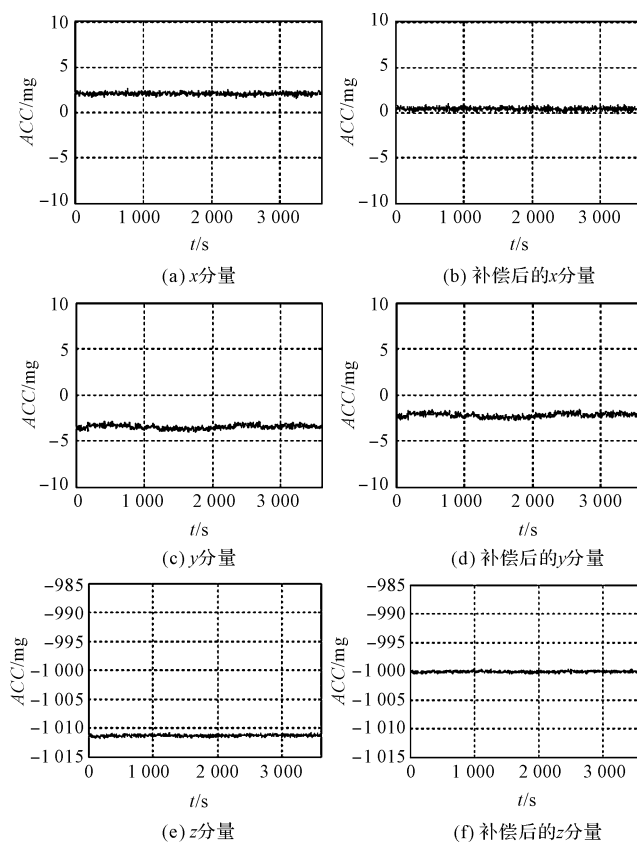


图 4 对加速度计的误差补偿

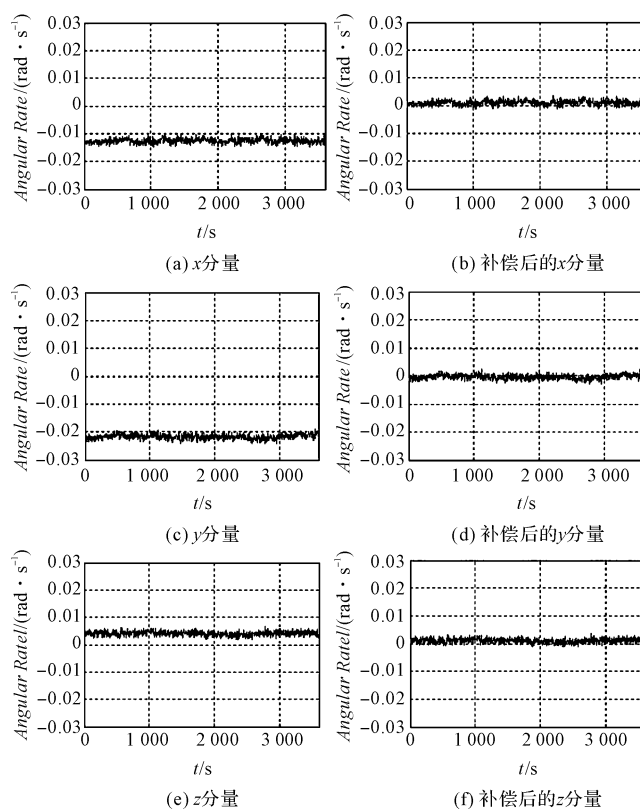


图 5 对陀螺仪的误差补偿

4.2 位置估计实验

实验的预设路径为直径 9 700 mm 的圆形,控制

AGV 跟踪该路径运行 50 次,根据采集的数据绘制图如图(6~7)所示。

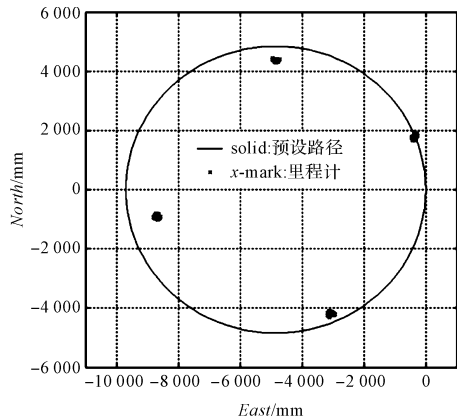


图 6 里程计

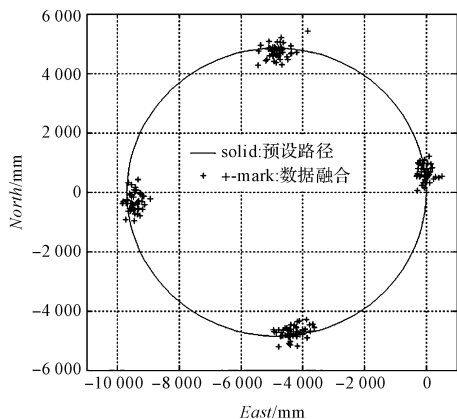


图 7 卡尔曼滤波

由图(6~7)可见,测距法估计出比真实圆形更小的位置,而卡尔曼滤波的结果在真实数据的上下波动,虽然方差较大,但具有更高的准确性。具体地,两种方式在 4 个位置的均值和标准差,位置估计实验数据如表 1 所示。

表 1 位置估计实验数据

位置	方法	均值	标准差
(-4 850 4 850)	odo	(-4 851 4 371)	(49.87 37.78)
	kal	(-4 955 4 799)	(250.86 235.83)
(-9 700 0)	odo	(-8 696 ,-910.9)	(41.02 48.05)
	kal	(-9 476 ,-250.6)	(201.1 269.84)
(-4 850 ,-4 850)	odo	(-3 509 ,-4 190)	(47.03 42.79)
	kal	(-4 307 ,-4 741)	(376.93 172.19)
(0 0)	odo	(-375.3 1 777)	(39.21 55.36)
	kal	(1.54 619.9)	(173.76 262.45)

Odo—单独使用里程计算法; kal—本文提出的算法

由此可见,与仅使用里程计算法相比,本文提出的算法具有更高的准确性。

5 结束语

针对 AGV 的室内定位问题,本文提出了一种相对

位置估计算法来实现航迹推算,其结合了惯性导航系统与里程计算法。为了补偿惯性导航与里程计算法中的累积误差,本研究设计了卡尔曼滤波器来对传感器的数据进行融合。最后基于两轮 AGV 实验平台,本研究对误差补偿算法与位置估计算法进行了验证。

实验的结果表明:该算法有效地提升了位姿估计的精度与稳定性。为进一步借助外部信号来提升 AGV 的室内组合定位精度提供更好的相对定位基础,同时将有助于提升 AGV 定位系统在外部信号干扰与缺失时的稳定性。

参考文献 (References):

[1] 倪维晨. 自动导引车控制系统的研究与应用 [D]. 天津: 天津理工大学机械工程学院, 2012.

[2] 刘佳耀,袁佳艳,陶卫军,等. 一种配备智能机械臂的 AGV 设计与实现 [J]. 兵工自动化, 2016, 35(10) : 38-31.

[3] RONZONI D, OLM I R, SECCHI C, et al. AGV global localization using indistinguishable artificial landmarks [C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai: IEEE, 2011.

[4] YOON S W, PARK S B, KIM J S. Kalman filter sensor fusion for Mecanum wheeled automated guided vehicle localization [J]. Journal of Sensors, 2015(8) : 1-7.

[5] NAGASAKA Y, TAMAKI K, NISHIWAKI K, et al. A global positioning system guided automated rice transplanter [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18) : 41-46.

[6] YAYAN U, YUCEL H, YAZICI A. A low cost ultrasonic based positioning system for the indoor navigation of mobile robots [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 78(3-4) : 541.

[7] UREA J, GUALDA D, HERNANDEZ, et al. Ultrasonic local positioning system for mobile robot navigation: from low to high level processing [C]. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology, Seville: IEEE, 2015.

[8] ROEHRIG C, HELLER A, HESS D, et al. Global localization and position tracking of automatic guided vehicles using passive RFID technology [C]. Proceeding of 41st International Symposium on Robotics, Munchen: IEEE, 2014.

[9] PIERLOT V, DROOGENBROECK M V. A new three object triangulation algorithm for mobile robot positioning [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(3) : 566-577.

[10] SILVA O D, MANN G K I, GOSINE R G. An ultrasonic and vision-based relative positioning sensor for multirobot localization [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3) : 1716-1726.

[11] OMARI S, BLOESCH M, GOHL P, et al. Dense visual-inertial navigation system for mobile robots [C]. 2015

- IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Washington: IEEE 2015.
- [12] MARTNEZ B H, HERRERO P D. Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments [J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** 2010 26(4):296-311.
- [13] AOKI H, ANN R S, TANAKA A, et al. Odometer correction method using disturbed environmental magnetic field [C]. 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics, Tokyo: IEEE 2014.
- [14] LU M F, LIU B C, WU J P, et al. The indoor automatic guided vehicle with an IR positioning and low-cost inertial navigation system [J]. **Applied Mechanics and Materials** 2013(300-301):494-499.
- [15] HELLMERS H, NORRDINE A, BLANKENBACH J, et al. An IMU/magnetometer-based indoor positioning system using kalman filtering [C]. 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Guimaraes: IEEE 2013.
- [16] 张永泽, 艾长胜, 张 尉. 惯导与视觉相结合的 AGV 小车控制系统设计 [J]. **山东工业技术**, 2015(20):236-236.
- [17] NOURELDIN A, KARAMAT T B, GEORGY J. Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg 2013.
- [18] BISHOP G, WELCH G. An introduction to the kalman filter [J]. **University of North Carolina at Chapel Hill**, 2013 8(7):127-132.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

吴 鹏, 李东京, 贡 超. 一种惯性传感器与编码器相结合的 AGV 航迹推算系统 [J]. **机电工程** 2018 35(3):310-316.WU Peng, LI Dong-jing, YUN Chao. Dead reckoning localization system for AGV using inertial sensors and wheel revolution encoding [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018 35(3):310-316.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 273 页)

计算结果表明:塔筒法兰的极限强度及疲劳强度安全系数均大于 1,能够满足强度设计要求,同时塔筒法兰的危险位置与工程实际较为吻合,说明提出的计算方法是可靠实用的,能够为风力发电机组塔筒法兰的设计提供必要的依据,具有一定的工程实用价值。

参考文献 (References):

- [1] 周姝灿, 唐俊熙. 风电、储能参与系统调频的协调控制策略研究 [J]. **机电工程技术** 2017 46(11):31-35.
- [2] 关媛媛, 刘大江, 邢 艳. L 型法兰盘在风力发电机上的应用 [J]. **硅谷** 2014(6):77-78.
- [3] 张 荣, 何玉林, 牛兴海, 等. MW 级风力发电机塔顶法兰连接系统有限元分析 [J]. **制造业自动化** 2012 34(23):112-114.
- [4] Germanischer Lloyd. Rules and guidelines industrial services: guideline for the certification of wind turbines [M]. Hamburg: Germanischer Lloyd 2010.
- [5] 晁贯良, 苏凤宇, 董姝言, 等. MW 级风力发电机塔顶法兰有限元计算 [J]. **机械与电子** 2016 34(1):46-50
- [6] 杜 静, 牛兴海, 何玉林, 等. 大功率风力发电机组塔顶法兰疲劳分析 [J]. **机械科学与技术** 2012 31(10):53-57
- [7] 杜 静, 常慧英, 石秉楠. 风力发电机塔筒顶部法兰的有限元分析 [J]. **现代制造工程** 2014(4):54-58.
- [8] 姚兴佳, 刘光德, 邢作霞, 等. 大型变速风力发电机组总体设计中的几个问题探讨 [J]. **沈阳工业大学学报** 2006 28(2):5-11.
- [9] 余 娟, 余明友, 金建伟, 等. 螺栓连接中预紧力的有限元分析 [J]. **软件导刊** 2013(9):64-66.
- [10] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

[编辑:周昱晨]