

基于超声波/INS 信息融合的室内定位方法

周先赞¹, 熊 剑¹, 郭 杭², 衷卫声¹

(1. 南昌大学 信息工程学院测控教研室, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学 空间科学与技术研究院, 江西 南昌 330031)

摘 要:室内定位方法中,低成本惯性导航系统(INS)的定位误差随着时间和距离的增加而积累,需要采用其他手段抑制误差发散。室内环境下 GPS 无法正常工作,从而失去对 INS 误差的抑制作用;因此,该文提出了基于超声波/INS 信息融合的室内定位方法。以自主引导小车(AGV)为定位终端,根据超声波定位技术和非完整约束条件得到自主引导小车的位置和速度信息,并利用该信息辅助 INS,通过卡尔曼滤波进行信息融合,从而抑制纯惯导情况下定位误差发散的问题。采用 Matlab 对所提出的室内定位方法进行仿真验证,结果表明,采用超声波/INS 信息融合方法能将 INS 的误差抑制在一定范围内,该方法适用于室内移动物体的实时定位。

关键词:惯性导航系统(INS);超声波定位技术;室内定位;卡尔曼滤波

中图分类号: TN96

文献标识码: A

The Indoor Positioning Method Based on Ultrasonic/INS Information Fusion

ZHOU Xianzan¹, XIONG Jian¹, GUO Hang², ZHONG Weisheng¹

(1. Teaching and Research Section of Measuring & Control Engineering, Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The low-cost inertial navigation system(INS) positioning error will be accumulated with the increase of the time and distance in the indoor positioning method, other methods are needed to restrain the error accumulation. GPS can't work at the indoor environment, thus the suppression of the INS error will be ineffective. An indoor positioning method based on ultrasonic/INS information fusion has been proposed in this paper. Using the automated guided vehicle (AGV) as the positioning terminal, the AGV's position and velocity informations were gained through the ultrasonic positioning technology and nonholonomics constraint conditions, and the informations were used to aid AGV inertial navigation system, the information fusion was carried out through Kalman filter, thus inhibiting the error divergence problem. The proposed indoor positioning method was simulated and verified by using Matlab. The results show that using the ultrasonic/INS information fusion can suppress the INS error within a certain range, and is suitable for indoor real-time positioning of moving object.

Key words: inertial navigation system(INS); ultrasonic positioning technology; indoor positioning; Kalman filter

0 引言

GPS 接收机在室内工作时,信号受建筑物的影响而衰减,无法满足人们对活动频繁的室内定位导航^[1]。因此,如何解决室内的高精度可靠定位成为许多专家学者们研究的重点。常用的室内定位法有红外技术、Zigbee 技术、无线蓝牙技术、超宽带技术、超声波技术及惯性导航系统(INS)^[2]。

INS^[3]不依赖外部信息,利用惯性测量单元

(IMU)测量载体运动信息,提供载体的三维姿态、位置和速度信息,具有全天候、完全自主、不受电磁干扰工作的特性。基于微机电系统(MEMS)的 IMU 具有系统体积小及成本低的特点,特别适用于低成本场合,已普遍应用于室内定位法中^[4]。低成本的 INS 定位精度较差,且定位误差随着时间和距离的增加而积累,不能长时间内单独使用。室内环境下,GPS 由于无法接收到信号^[5],导致其失效,使

收稿日期:2015-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41374039);江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ14125);国家自然科学基金资助项目(41164001);江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ13056)

作者简介:周先赞(1990-),男,山西省吕梁人,硕士生,主要从事超声波导航、组合导航方面的研究。E-mail:zhouxianzan@email.ncu.edu.cn。通信作者:熊剑(1977-),男,江西省抚州人,博士,讲师,主要从事多源信息融合、非线性滤波方面的研究。E-mail:xiongjian@ncu.edu.cn。

INS单独工作,导致误差扩散,因此,需要采取其他的辅助手段与INS进行信息融合,以抑制INS定位误差的发散。

针对室内环境下纯惯导定位误差随时间和距离的增加而无法抑制的问题,提出了基于超声波/INS信息融合的室内定位法。利用超声波定位法及非完整性约束条件得到的位置、速度信息,与INS经卡尔曼滤波(KF)进行信息融合,以自主导引小车(AGV)为定位终端,采用MATLAB对所提出的室内定位法进行仿真验证。结果表明,该方法能抑制INS的定位误差,适用于室内移动物体的实时定位。

1 INS定位法

INS由陀螺仪和加速度计等惯性器件组成,以牛顿力学定律为基础,测量载体的角加速度及运动加速度等信息,经积分运算得到载体的速度及位置等导航参数,具有全天候、完全自主且不受外部干扰及短时定位精度高等特点。但INS导航误差随着时间和距离的增加而无法抑制。

室内定位法一般用于移动机器人、自主导引小车等二维平面的定位终端,在天向(地理坐标系)方向变化不大,因此,可将INS简化为二维模型,如图1所示。图中, a_x, a_y 分别为 x, y 方向上的载体运动加速度; v_{x0}, v_{y0} 分别为 x, y 方向上的载体初始速度; x_0, y_0 分别为 x, y 方向上的载体初始位置;右端 x, y 分别代表 x, y 方向经过积分运算得到的位置信息。由 x, y 方向上的加速度计输出通过积分运算得到定位终端的速度,二次积分得到位置信息,INS本质上是一种推算式定位方法^[8],定位误差随着时间和距离的增加而积累,长时间单独工作会造成误差发散,需采用其他手段抑制误差积累。室外环境下,通常采用GPS辅助INS,但在室内情况下,GPS无法接收到信号,因而不能正常工作。因此,需其他的室内定位法辅助INS抑制其误差发散。

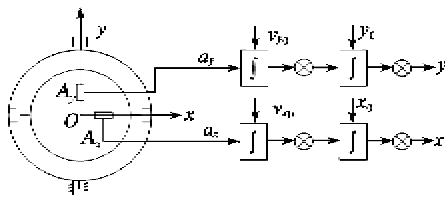


图1 惯性导航系统二维定位原理图

2 超声波定位法

与其他方法相比,超声波室内定位法具有成本

低,抗电磁干扰能力强,不受光线烟雾影响,时间信息直观和定位精度高等特点。但单纯的超声波定位系统在实际应用中会有多路径效应及多址干扰等影响定位精度,在复杂的室内环境下不适合单独使用。因此,采用超声波定位法与INS信息融合进行室内定位。

典型的室内超声波定位系统有Cricket定位系统^[7]和Active Bat定位系统^[8]。Cricket系统基于超声波技术和射频技术,它由用户携带的接收器、固定位置在建筑物内的信标及中心服务器组成。信标发送超声波脉冲及携带数据包的射频信号,每个信标被赋予唯一的识别码,接收器测量两种信号的到达时间差,计算出与信标的间距。Active Bat定位系统由控制器发射射频信号,需定位物体接收到射频信号发送超声波脉冲,固定位置在建筑物内的信标用于接收两种信号到达的时间差,计算出与定位物体的间距。

为抑制多址干扰引起的定位误差,基于超声波/INS信息融合的室内定位法中采用基于码分多址技术的超声波室内定位方法^[9-11],如图2所示。该方法是在室内布置多个信标节点,在发送端,各信标节点采用二进制幅移键控(BASK)调制得到调制信号并发送;经过信道传输,在定位终端(即AGV),将接收到的信号解调得到混合伪随机序列,使用相同的伪随机码进行自相关运算,识别各路超声波信号并获取到达时间,进行定位运算。

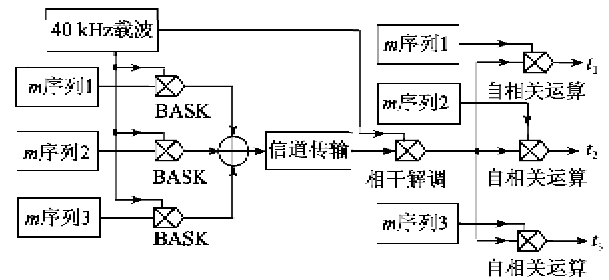


图2 超声波CDMA定位原理图

假设定位终端的位置信息为 (x, y, z) ,信标节点 $S_1 \sim S_3$ (超声波发射器)坐标分别为 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, 3$),根据渡越时间法可测得信标节点到自主导引小车的距离 d_i ,则有

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = d_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = d_2^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)即可求得定位终端的三维坐标信息。

3 超声波/INS 信息融合系统模型

3.1 系统组合模式

超声波/INS 信息融合的室内定位方法应用于室内移动物体的实时定位,以自主导引小车作为应用对象进行分析。理想情况下,在二维平面中行驶的自主导引小车受到两个非完整性约束条件的限制:与前行方向垂直的方向上的速度等于 0,可把该值看作东向、天向速度虚拟传感器对东向、天向方向速度的测量值。实际应用中可用高斯白噪声来模拟满足非完整性约束的情况,即:

$$\begin{cases} v_{tx} - v_x = 0 \\ v_{tz} - v_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{tx}, v_{tz} 为自主导引小车在机体坐标系 b 系中 x, z 方向上的速度分量; v_x, v_z 是均值为 0、方差分别为 σ_x^2, σ_z^2 的高斯白噪声。

假设自主导引小车前行方向速度为 $v(t)$,若转换到导航坐标系 n ,则速度观测量为

$$v = C_b^n \cdot \begin{bmatrix} v_{tx} \\ v(t) \\ v_{tz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

自主导引小车前行行驶速度

$$v(t) = \frac{\sqrt{(x_{t+1} - x_t)^2 + (y_{t+1} - y_t)^2 + (z_{t+1} - z_t)^2}}{\Delta t} \quad (4)$$

式中: $(x_{t+1}, y_{t+1}, z_{t+1})$ 与 (x_t, y_t, z_t) 分别为 $t+1$ 时刻和 t 时刻通过超声波定位方法测得的位置信息; Δt 为经历的时间差。

图 3 为超声波/INS 信息融合系统总体结构框图。图中, v_I, P_I 分别为惯性导航系统输出的速度、位置信息, P_U, v_U 分别为超声波定位系统及非完整性约束条件提供的位置、速度信息, $\delta P, \delta v$ 为位置、速度之差, $\delta P_1, \delta V_1$ 为卡尔曼滤波输出值。INS、超声波定位系统及非完整性约束条件为组合导航系统信息源。系统主要机制为:

1) 导航系统进行初始化设置。

2) INS、超声波定位技术和非完整性约束分别提供 AGV 的速度和位置信息,应用该信息建立系统模型。

3) 根据所建立的系统模型,将信息输入卡尔曼滤波器进行信息融合。

4) 利用滤波值对 INS 进行闭环反馈修正。

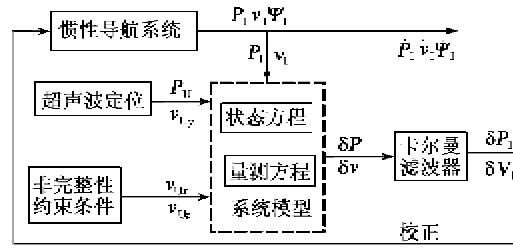


图3 系统组合模式图

3.2 系统信息融合算法

采用卡尔曼滤波对所建立的系统模型进行信息融合。

3.2.1 组合导航系统数学模型状态方程

组合导航系统数学模型状态方程^[12]:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (5)$$

式中: $F(t)$ 和 $G(t)$ 分别为系统方程状态系数矩阵和误差系数矩阵; X 为系统状态矢量,且

$$X = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_{tx}, \epsilon_{ty}, \epsilon_{tz}, \epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T \quad (6)$$

式中: $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为位置误差; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 为东、北、天速度误差; ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为东、北、天平台误差角; $\epsilon_{tx}, \epsilon_{ty}, \epsilon_{tz}, \epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}$ 为陀螺漂移沿载体坐标系分量; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加速度计漂移沿载体坐标系分量。AGV 自主导航时姿态误差角为小角,可不考虑高度通道。

W 为系统白噪声随机误差矢量,且

$$W = [\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}, \omega_{rx}, \omega_{ry}, \omega_{rz}, \omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}]^T \quad (7)$$

3.2.2 组合导航系统数学模型量测方程

在图 3 中,量测输入值有位置和速度两组,即超声波定位技术得到的 AGV 位置、前向速度及非完整性约束条件得到的另外两个方向的速度信息与 INS 输出的位置、速度之差作为位置、速度误差观测量,构建量测方程为

$$Z_{p,v}(t) = \begin{bmatrix} \delta P(t) \\ \delta V(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_I - P_U \\ v_I - v_U \end{bmatrix} = H(t)X(t) + V(t) \quad (8)$$

式中: $\delta P(t), \delta V(t)$ 为系统量测方程观测量; 观测噪声 $V(t)$ 为随机白噪声; $H(t)$ 为

$$H(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 6} & \text{diag}[R_M & R_N \cos L & 1] & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \text{diag}[1 & 1 & 1] & \mathbf{0}_{3 \times 12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: L 为纬度; R_M , R_N 分别为卯酉圈和子午圈曲率半径。

4 仿真与分析

根据图3及信息融合算法结合卡尔曼滤波方程,以自主导引小车作为定位终端,采用Matlab对所提出的基于超声波/INS信息融合的室内定位方法进行仿真验证。自主导引小车作实时运动,假设自主导引小车的初始速度为0,从起点(0,0)出发,以 0.05 m/s^2 的加速度作匀加速运动,当速度达 1 m/s 时开始匀速运动,然后作直行、转弯等运动。INS中陀螺仪的漂移为 $0.1 (^{\circ})/\text{h}$;等效加速度计零偏为 $10^{-4} g (g=9.8 \text{ m/s}^2)$ 。仿真步长为 0.02 s 。

图4为自主导引小车运动轨迹图。可见纯惯导状态下自主导引小车轨迹在刚开始短时间内与理想轨迹较吻合,随着时间的增加,误差逐渐增大,轨迹逐渐远离理想轨迹,可见纯惯导的误差是发散的;而经过超声波/INS信息融合后的运动轨迹与理想轨迹基本吻合,误差不随时间的增加而增大,很好地抑制了纯惯导状态下定位误差发散的问题。

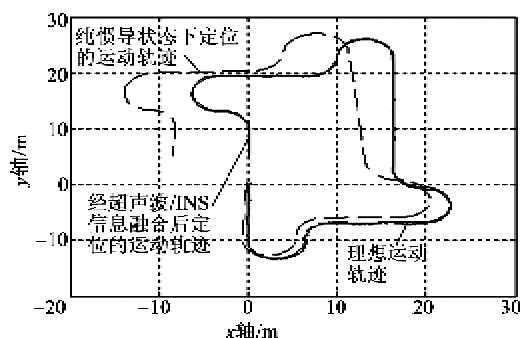


图4 自主导引小车运动轨迹

图5、6分别为采用基于超声波/INS信息融合的室内定位方法后,自主导引小车在 x 、 y 轴上的位置误差曲线。由图可看出,经 40 s 的收敛时间,自主导引小车在 x 轴上位置误差稳定在 0.15 m 左右, y 轴上位置误差稳定在 0.23 m 左右,具有较高的定位精度。

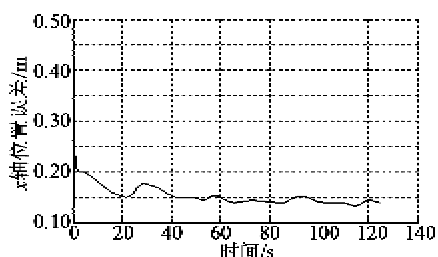


图5 经度误差

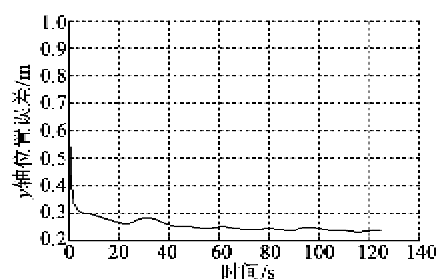


图6 纬度误差

5 结束语

针对纯惯导状态下定位误差随时间和距离的增加而发散的问题,提出了基于超声波/INS信息融合的室内定位法。以自主导引小车作为定位终端,引入超声波定位方法和非完整性约束条件得到自主导引小车的位置和速度信息,利用该信息与惯性导航系统通过卡尔曼滤波进行数据融合以实现定位。采用MATLAB对所设计的室内定位法进行仿真验证,仿真结果表明基于超声波/INS信息融合的室内定位法具有很好的收敛性,可抑制纯惯导定位误差发散,具有较高的定位精度。因此,基于超声波/INS信息融合的室内定位法适用于室内移动物体的实时定位。

参考文献:

- [1] LI Yun, FINGER A. Channel model-based sensing for indoor ultrasonic location system[C]//Germany: Proceedings of the 8th Workshop on Positioning Navigation and Communication, 2011: 83-88.
- [2] 杨阳,肖金红,刘智,等.基于超声波的室内三维定位系统[J].吉林大学学报(信息科学版),2012,3(30):267-271.
YANG Yang, XIAO Jinhong, LIU Zhi, et al. Indoor three-dimensional positioning system based on ultrasonic[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2012, 3(30): 267-271.
- [3] 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: 494-499.
- [4] MICHIO W, MASASHI F, YUKINORI K. Intelligent AGV driving toward an autonomous decentralized manufacturing system[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17: 57-64.

(下转第323页)