

基于捷联惯性导航的室内定位系统研究

朱立明, 杜双伟, 李海, 徐寅林

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 基于捷联惯性导航的室内定位系统是综合运用 MPU6050 陀螺加速度计模块、HMC5983 三轴电子指南针模块和蓝牙模块来实现定位。系统以 STM32 单片机为控制核心, 依次算出四元数和旋转矩阵, 并利用卡尔曼滤波算法计算最优姿态角, 在此基础上获取载体在导航坐标系中的运动加速度, 通过对加速度的两次积分计算出载体在导航坐标系中的位置信息。为了克服惯性导航固有的不可消除的积累误差, 布设关键通信节点, 采用局部蓝牙通信定位, 并通过加权平均融合对位置信息做出修正, 提高了定位系统的定位精度。

[关键词] 姿态角, 卡尔曼滤波算法, 四元数, 旋转矩阵, 导航坐标系, 加权平均融合

[中图分类号] TP302 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0042-06

Research on Indoor Positioning System Based on Strapdown Inertial Navigation

Zhu Liming, Du Shuangwei, Li Hai, Xu Yinlin

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The indoor positioning system based on the strapdown inertial navigation comprehensively uses the module of gyroscope and accelerometer named MPU6050, the module of three axis electronic compass named HMC5983 and Bluetooth module to realize positioning. The system takes the STM32 MCU as the core of the control. It needs calculating the quaternion and rotation matrix and makes use of Kalman filtering algorithm to calculate the optimal attitude angle. On this basis, it gets acceleration in the coordinate system of the navigation. Through the two integrals for acceleration, the position information in the coordinate system of the navigation is calculated. Considering the inertial navigation inherently can't eliminate the accumulated error. The paper creatively sets the key communication nodes. It adopts the local Bluetooth communication localization. It improves the positioning accuracy of the positioning system by the algorithm of weighted average fusion revising the position information.

Key words: attitude angle, Kalman filtering algorithm, quaternion, rotation matrix, the coordinate system of the navigation, weighted average fusion

惯性导航技术最早应用在 V2 火箭上, 但由于当时的工业水平和消除噪声算法的限制使其导航误差很大。随着航空、航天科技的迅猛发展, 迫切需要一款精度高、小巧方便、功耗低、抗干扰能力强的导航系统。这促使更多的工程技术专家和学者们投入到对惯性器件和导航算法的研究与改进中。其中, 惯性器件主要有旋转质量陀螺仪、激光陀螺仪、光纤陀螺仪(FOG)、集成光学陀螺仪(IOG)、半球谐振子陀螺仪(HRG)、微电子机械系统(MEMS)等, 导航算法主要有四元数法、卡尔曼滤波等。这些共同构成了现代惯性导航^[1]的基础。

姿态角直接反映了载体与导航坐标系各轴的角度关系, 姿态角的精确度对减小加速度比力换算误差起着重要作用, 同时也影响着定位的准确性。早期室内定位系统未安装三轴电子指南针模块, 只能人为给定一个初始值, 再通过毕卡逼近法的二阶近似迭代算法实时计算现状态下四元数的值, 然后用四元数计算出状态下的旋转矩阵, 最后用旋转矩阵解算出实时姿态角。由于初始姿态角不断通过二阶近似迭代

导致其累积误差很大且无法得到补偿,本设计针对此特定问题增加了三轴电子指南针模块以实现对姿态角的实时修正,补偿姿态角误差所造成的位置累积误差.考虑到室内定位应用场合,运动载体增加了蓝牙通信模块,并在室内关键位置节点布设了相应的蓝牙通信节点.通过几个位置修正节点发来的 RSSI(接收信号强度指示)值计算出载体的位置,并对已有的位置信息进行修正,补偿位置信息的累积误差,大大提高了室内定位系统的精度,且可与服务端通信实现更多的附加功能.系统可广泛应用于超市、大型商场、博物馆、机场等,发展空间广阔,市场前景良好.

1 系统的整体设计方案和实现定位的流程图

1.1 系统的整体设计方案

该系统主要由手持部分和蓝牙位置修正节点部分组成,如图 1、图 2 所示.手持部分包含 STM32 单片机、MPU6050 陀螺加速度计模块、HMC5983 三轴电子指南针模块、蓝牙模块和液晶显示屏. STM32 单片机通过 IIC 协议和 USART 协议与各模块进行通信.蓝牙位置修正节点由单片机控制蓝牙模块,通过 USART 协议与蓝牙模块进行通信,并向手持部分发送自身 ID 和坐标信息.

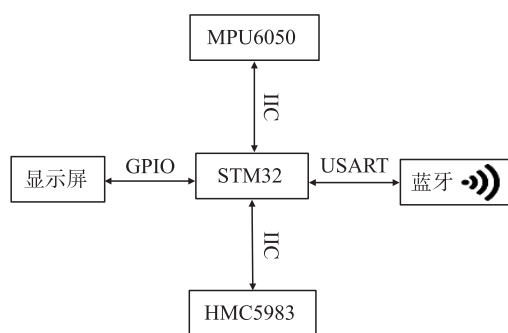


图1 手持部分

Fig.1 Hand-held device

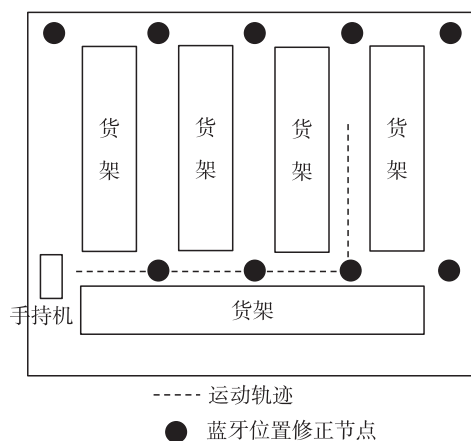


图2 系统组成

Fig.2 System composition

1.2 定位实现流程图

为实现对移动载体的定位,首先采集三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴指南针的数据各 20 组并求其平均值消除偶然误差.为实现对加速度的比力换算,采用毕卡逼近法的二阶近似迭代算法更新四元数值并计算现状态下的旋转矩阵和最优姿态角完成比力换算.最后对导航坐标系下的加速度两次积分得出现状态下的位置信息.为进一步优化定位算法,要对载体的姿态角是否变化和是否检测到蓝牙修正节点进行判定.在载体姿态角不发生变化的情况下,判断陀螺仪三个轴输出值的平均值是否为 0 (理想情况下,载体姿态保持不变陀螺仪的输出一直为 0;而实际情况下,由于震动等原因导致载体姿态略微变化使得陀螺仪的输出绝对值略大于 0).这样做在一定程度上不仅可以减小累积误差,还可以提高运算速度.在检测到蓝牙位置修正节点时,还需通过蓝牙位置修正节点计算出的位置信息,并与惯性器件所计算出的位置信息进行加权平均融合,以补偿位置信息的累积误差.定位流程如图 3 所示.

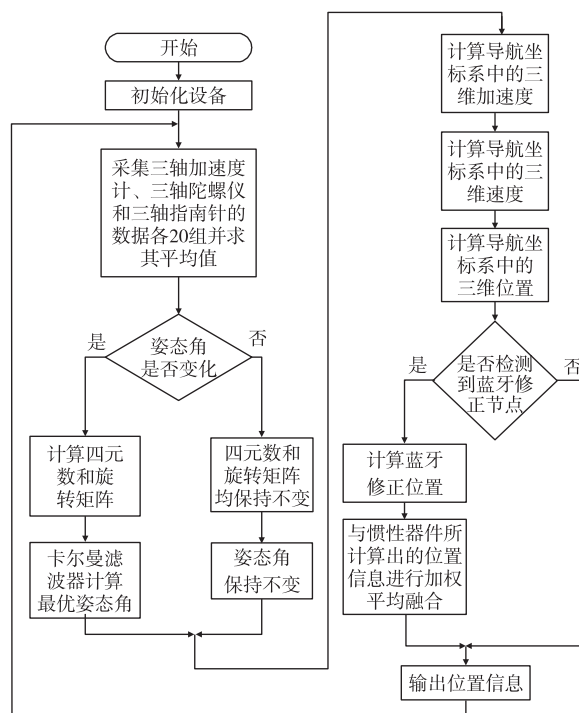


图3 定位流程图

Fig.3 The flow chart of positioning

2 定位算法设计

定位算法是室内定位系统的核心,为实现对运动载体的精确定位,需利用实时更新的四元数值来计算旋转矩阵,并通过旋转矩阵解算出载体在现状态下的姿态角^[2]. 针对姿态角的累计误差问题,需利用加速度计和指南针测量出的姿态角进行加权平均融合计算得出修正后的最优姿态角. 还需利用比力换算完成加速度由载体坐标系到导航坐标系的换算,并对导航坐标系下的加速度两次积分得到现状态下的位置信息. 针对惯性定位系统位置信息固有的累计误差问题,需通过蓝牙位置修正节点来修正误差.

2.1 姿态角的计算

姿态角通过四元数^[3]计算旋转矩阵得到. 四元数算法中涉及到两个坐标系,载体坐标系(b 系)和导航坐标系(n 系). 四元数算法能够快速实现 b 系到 n 系的坐标转换,如图4所示,即先用毕卡逼近法的二阶近似迭代算法更新四元数的值并对其进行归一化处理,再通过归一化后四元数计算出旋转矩阵^[4]:

$$C_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

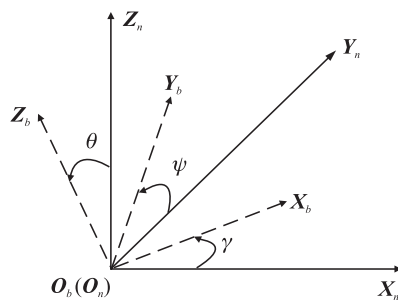


图4 刚体定点转动坐标变换图

Fig.4 The Coordinate transformation diagram of the rigid body rotation at fixed-point

式中, C_n^b (n 系到 b 系)为旋转矩阵, q_0 是四元数的标量部分,表示转角的一半余弦值, $q_1 \sim q_3$ 是四元数矢量部分的系数,表示瞬时转动轴的方向、瞬时转动轴与参考坐标系轴间的方向余弦值. 因旋转矩阵为正交矩阵,满足 $C_b^n = (C_n^b)^{-1} = (C_n^b)^T$,即可求出旋转矩阵 C_b^n . 从旋转矩阵的三角表达式^[5]中即可解算出姿态角(I):

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi \sin \theta & -\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \theta & -\sin \gamma \cos \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \gamma \cos \psi - \cos \gamma \sin \psi \sin \theta & -\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由式(2)可知:

$$\begin{cases} \theta_1(k) = \arcsin(C_n^b[2][3]), \\ \gamma_1(k) = \arctan2(-C_n^b[1][3], C_n^b[3][3]), \\ \psi_1(k) = \arctan2(C_n^b[2][1], C_n^b[2][2]). \end{cases} \quad (3)$$

整个计算流程如图5所示.

2.2 姿态角的修正计算

由于相对角速度存在一定误差,随着时间的推移姿态角(I)中 $\theta_1(k)$ 、 $\gamma_1(k)$ 、 $\psi_1(k)$ 的累积误差会越来越大. 因此,必须通过采集加速度计和指南针模块的数据,来推算出姿态角(II) $\theta_2(k)$ 、 $\gamma_2(k)$ 、 $\psi_2(k)$ ^[6],并将二者进行加权平均融合以补偿累积误差. 融合计算时各权重系数的大小取值目前还没有很好的解决方法,需凭经验反复试探测试,根据现场情况反应决定. 一般来说,在载体静止或匀速运动且俯仰角和横滚角较小时姿态角(II)误差较小,可加大其权重,否则应减小其权重以减小误差. 本文初步测试时各取0.5,基本能得出比较明显的修正结果. 在此采用多个器件和计算方法计算姿态角,可减小单个器件和计算方法带来的误差,在一定程度上可提高精确度. 需要注意的是加速度计在载体静止或匀速运动状态下且指南针模块不受干扰时测量出的姿态角(II) $\theta_2(k)$ 、 $\gamma_2(k)$ 、 $\psi_2(k)$ 比较接近真实值. 因此,在实际应用中为了尽可能地排除干扰和保证计算的准确性必须对其读出的数据进行卡尔曼滤波^[7]再计算,如图6所示. 最后,将得到的两个姿态角进行加权平均融合修正,得出最优姿态角 $\theta(k)$ 、 $\gamma(k)$ 、 $\psi(k)$:

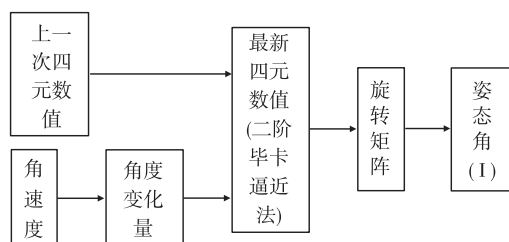


图5 姿态角(I)

Fig.5 Attitude angle(I)

$$\begin{cases} \theta(k) = 0.5\theta_1(k) + 0.5\theta_2(k), \\ \gamma(k) = 0.5\gamma_1(k) + 0.5\gamma_2(k), \\ \psi(k) = 0.5\psi_1(k) + 0.5\psi_2(k). \end{cases} \quad (4)$$

最优姿态角计算流程如图 7 所示.

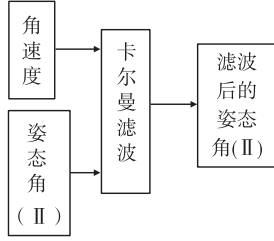


图6 姿态角(II)

Fig.6 Attitude angle(II)

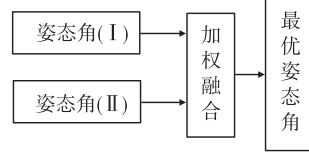


图7 最优姿态角

Fig.7 Optimal attitude angle

2.3 移动载体的位置信息计算

首先,对位置信息进行初始化,即设初始位置 $L(0) = (x, y, z)^T = (0, 0, 0)^T$. 然后,对加速度计测量出的加速度进行比力换算可得出载体在导航坐标系中的加速度,即:

$$\mathbf{a}_n(k) = \mathbf{C}_b^n(k) \cdot \mathbf{a}_b(k). \quad (5)$$

对加速度 $\mathbf{a}_n(k)$ 积分一次可得载体在导航坐标系中的速度,即:

$$\mathbf{v}_n(k) = \mathbf{v}_n(k-1) + [t(k) - t(k-1)] \cdot \mathbf{a}_n(k). \quad (6)$$

对速度 $\mathbf{v}_n(k)$ 积分一次可得载体在导航坐标系中的位置,即:

$$\mathbf{L}_c(k) = \mathbf{L}(k-1) + [t(k) - t(k-1)] \cdot \mathbf{v}_n(k). \quad (7)$$

即可得到未经蓝牙修正的位置信息 $\mathbf{L}_c(k)$.

2.4 蓝牙位置修正节点

蓝牙位置修正节点是基于接收信号强度指示(RSSI)来定位的,在实际应用中一般采用简化的渐变模型^[8]:

$$[p(d)]_{dBm} = [p(d_0)]_{dBm} - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (8)$$

式中, $[p(d)]_{dBm}$ 表示距离发射机为 d 时接收端接收到的信号强度,即 RSSI 值; $[p(d_0)]_{dBm}$ 表示距离发射机为 d_0 时接收端接收到的信号功率; d_0 为参考距离; n 为路径损耗(Pass Loss)指数,一般根据具体环境实际测量得到,为便于计算取 $d_0 = 1$ m,可得:

$$\text{RSSI} = A - 10n \lg(d), \quad (9)$$

式中, RSSI 为当前距离为 d 的信号强度, A 为无线收发节点距离为 1 m 的 RSSI 值. 为实现对手持载体的定位,在实际应用中,先让 $n(n \geq 3)$ 个蓝牙位置修正节点周期性地向手持载体发送自身的 ID 和位置信息的帧数据,再从中提取各个发射节点 RSSI 值和位置信息,为了消除 RSSI 值的误差^[9-10],可采样多次取平均值以提高精度. 最后运用式(9)来计算出各个已知节点与未知节点的距离 d . 假设 n 个已知蓝牙位置修正节点的坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 距离为 d_1, d_2, \dots, d_n , 手持载体的坐标为 (x, y) , 建立如下方程组:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2, \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2. \end{cases} \quad (10)$$

该方程组为非线性方程组,用方程组中的前 $n-1$ 个方程减去第 n 个方程后,得到线性化的方程:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{b}, \quad (11)$$

$$\text{其中, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}; \mathbf{X} = [x, y]^T.$$

用最小二乘法求解方程可得:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (12)$$

RSSI 测距定位流程如图 8 所示.

在公式 $\text{RSSI} = A - 10n \lg(d)$ 中, 环境对 RSSI 的值影响较大, 导致参数 A 和 n 的值不精确, 因此, 必须针对特定的环境对 A 和 n 的值进行优化. 通过采集特定环境的 L 个 (RSSI_i, d_i) 数据, 使用线性回归分析求出 A 和 n 的最优值:

$$\rho_i = -10 \lg d_i, \quad i = 1, 2, \dots, L, \quad (13)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^L (\rho_i - \bar{\rho}) \text{RSSI}_i}{\sum_{i=1}^L (\rho_i - \bar{\rho})^2}, \quad (14)$$

$$A = \overline{\text{RSSI}} - n\bar{\rho}. \quad (15)$$

其中, $\bar{\rho} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \rho_i$, $\overline{\text{RSSI}} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \text{RSSI}_i$.

2.5 移动载体位置信息的修正

考虑到捷联惯性导航本身固有的累积误差, 在关键节点上安装了蓝牙位置修正节点进行修正. 通过蓝牙位置修正节点所计算出载体的位置信息 $L_B(k)$ 与 $L_c(k)$ 进行加权平均融合即可得出 $L(k)$:

$$L(k) = 0.5L_B(k) + 0.5L_c(k). \quad (16)$$

其中, $L_B(k)$ 和 $L_c(k)$ 的权重也很难明确计算, 可根据实际情况进行调整, 两者之和为 1. 本文权重系数各取 0.5.

3 实验结果

首先, MPU6050 陀螺加速度计模块和 HMC5983 三轴电子指南针模块中的模数转换 (AD) 芯片以 125Hz 的采样频率分别采集直线行走和正方形行走时的相关数据. STM32 单片机通过定位算法分别计算出载体在现状态下的位置信息, 并通过蓝牙位置修正节点对其加权平均融合修正, 并将计算出的位置信息以 1 Hz 的发送频率通过蓝牙通信模块发送给上位机, 并运用 MATLAB 软件将得到的位置信息转化为载体的运动轨迹. 室内定位系统修正前与修正后的直线和正方形轨迹图如图 9、图 10 所示.

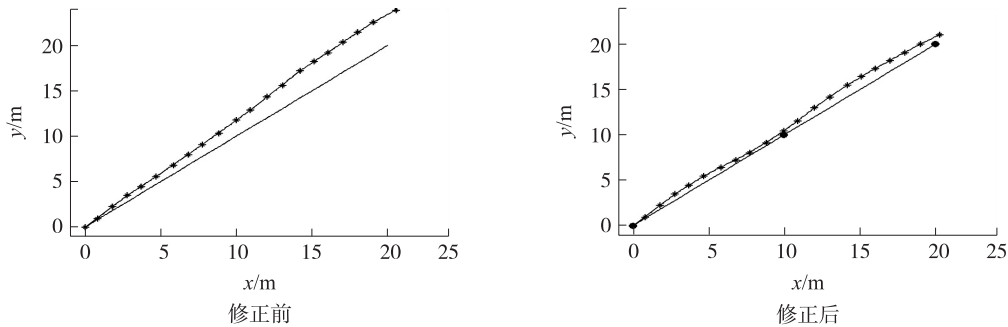


图9 直线轨迹图

Fig.9 The locus diagram of linear

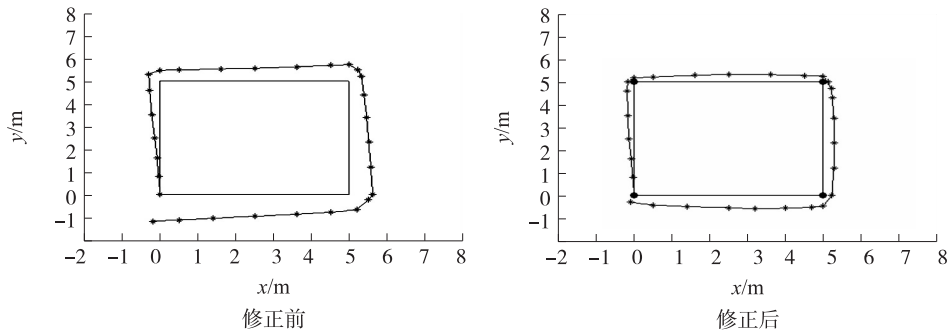


图10 正方形轨迹图

Fig.10 The locus diagram of square

从图 9、图 10 可知,载体的运动轨迹在未修正前,随着时间的推移,载体运动轨迹逐渐偏离实际运动路线.经过蓝牙位置修正节点(上图中的大黑点)修正后,位置信息的累积误差明显得到补偿.实验结果表明,基于捷联惯性导航的室内定位系统基本满足设计要求.

4 结语

本文设计并实现了一种基于捷联惯性导航的室内定位系统.论文首先介绍了该系统手持部分的组成,阐述了蓝牙位置修正节点的工作原理,并详细说明了实现室内定位的流程;然后设计了实现定位的算法,具体设计了计算载体的姿态角并利用加速度计和指南针测量出的姿态角来修正误差和计算载体的位置信息并通过蓝牙修正节点补偿位置的累计误差的算法;最后通过直线轨迹和正方形轨迹的实验验证了该系统的可行性与可靠性.

[参考文献](References)

- [1] 张炎华,王立端,战兴群,等. 惯性导航技术的新进展及发展趋势[J]. 中国造船,2008,49(183):135-138.
ZHANG Y H, WANG L D, ZHAN X Q, et al. New progress and developing trend of the technology of inertial navigation[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(183):135-138. (in Chinese)
- [2] 杜海龙,张荣辉,刘平,等. 捷联惯导系统姿态解算模块的实现[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1 957-1 959.
DU H L, ZHANG R H, LIU P, et al. Realization of the module of attitude calculation for the system of strapdown inertial navigation[J]. Optics and precision engineering, 2008, 16(10):1 957-1 959. (in Chinese)
- [3] 周江华,苗育红,李宏,等. 四元数在刚体姿态仿真中的应用与研究[J]. 飞行力学,2000,18(4):28-29.
ZHOU J H, MIAO Y H, LI H, et al. The application and research of the quaternion in the simulation of attitude simulation of the rigid body[J]. Flight dynamics, 2000, 18(4):28-29. (in Chinese)
- [4] 张晓玉. 基于 MEMS 的惯性导航系统研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2012:13-17.
ZHANG X Y. The research and design of the system of inertial navigation based on MEMS[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012:13-17. (in Chinese)
- [5] 李爽. 基于地磁传感器姿态角的探测方法仿真与实验研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2011:18-26.
LI S. The Simulation and experimental study of the method of detection based on the attitude angle of geomagnetic sensor[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2011:18-26. (in Chinese)
- [6] 唐玉发,张合,刘建敬. 基于磁阻传感器与加速度计复合的姿态角检测技术[J]. 传感器与微系统,2013,32(1):56-57.
TANG Y F, ZHANG H, LIU J J. The technology of the detection of attitude angle based on magnetic resistance sensor and accelerometer[J]. Transducer and microsystem technologies, 2013, 32(1):56-57. (in Chinese)
- [7] 秦永元,张洪钺,汪淑华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007:33-35.
QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Kalman filter and the principle of integrated navigation[M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Press, 2007:33-35. (in Chinese)
- [8] 章坚武,张璐,应瑛,等. 基于 ZigBee 的 RSSI 测距研究[J]. 传感技术学报,2009,22(2):285-286.
ZHANG J W, ZHANG L, YING Y, et al. Research on RSSI ranging based on ZigBee[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2009, 22(2):285-286. (in Chinese)
- [9] 方震,赵湛,郭鹏,等. 基于 RSSI 测距分析[J]. 传感技术学报,2007,20(11):2 528-2 529.
FANG Z, ZHAO Z, GUO P, et al. The analysis based on RSSI ranging[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2007, 20(11):2 528-2 529. (in Chinese)
- [10] 赵莉,李亚,陈国绍. 基于 RSSI 测距模型[J]. 兵工自动化,2014,33(12):53.
ZHAO L, LI Y, CHEN S G. The model based on RSSI ranging[J]. Ordnance industry automation, 2014, 33(12):53. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]