

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.013

面向室内场景的惯性磁感应定位方法

夏子权¹, 李新年¹, 闻帆¹, 于谦玺¹, 冯学光², 李清华¹

(1. 哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150001;

2. 中国人民解放军32380部队, 北京 100072)

摘要:针对卫星拒止的室内导航问题,在现有磁信标定位技术的基础上,通过分析低频旋转磁场的特点,建立了一种不受传感器姿态和磁信标磁矩信息影响的磁感应矢量夹角观测模型,并结合MEMS惯性导航的误差模型提出了一种以磁感应矢量夹角的正余弦值为量测信息的惯性磁感应动态定位方法,避免了磁传感器姿态误差和磁矩误差对定位结果的影响。利用实验室的双轴磁信标实验系统进行静态测试,验证了磁感应定位模型具有不受传感器姿态、环境中遮挡物以及磁矩影响的特点;通过数值仿真的方式对基于无迹卡尔曼滤波(UKF)的惯性磁感应定位方法进行验证,结果表明该方法能有效地抑制惯性导航的发散,且位置最大误差小于0.75 m,满足大多数室内场景下的高精度导航定位需求。

关键词:磁感应定位;惯性磁感应定位;无迹卡尔曼滤波;磁信标定位系统

中图分类号:V249.3

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2023)04-0132-08

Inertial magnetic-induction positioning method for indoor scenes

XIA Ziquan¹, LI Xinnian¹, WEN Fan¹, YU Qianxi¹, FENG Xueguang², LI Qinghua¹

(1. Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Unit 32380 of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at satellite denied problem of the indoor navigation, based on the existing magnetic beacon positioning technology, this paper analyzes the characteristics of low-frequency rotating magnetic field, establishes a magnetic induction vector angle observation model that is not affected by the sensor attitude and magnetic moment information of magnetic beacon, and combines the error model of MEMS inertial navigation, proposes an inertial magnetic-induction dynamic positioning method with the sine and cosine value of the magnetic-induction vector angle as the measurement information, and the influence of magnetic sensor attitude error and magnetic moment error on positioning results is avoided. Static test is carried out using the biaxial magnetic beacon experimental system in the laboratory, and it is verified that the magnetic-induction positioning model is not affected by the sensor attitude, the shelter in the environment and the magnetic moment. The inertial magnetic-induction positioning method based on unscented Kalman filter (UKF) is verified by numerical simulation. The results show that the method can effectively suppress the divergence of inertial navigation, and the maximum position error is less than 0.75 m, meeting the requirements of high-precision navigation and positioning in most indoor scenes.

Key words: Magnetic-induction positioning; Inertial magnetic-induction positioning; Unscented

收稿日期:2023-05-24;修订日期:2023-06-30

作者简介:夏子权(1997-),男,硕士研究生,主要从事组合导航、磁信标导航技术方面的研究。

通信作者:闻帆(1974-),男,博士,讲师,主要从事计算机视觉、组合导航技术方面的研究。

Kalman filter; Magnetic beacon positioning system

0 引言

近年来,随着智能无人系统、物联网等技术在室内环境的应用,人们对室内导航定位技术提出了更高的要求,低成本、高精度且易于维护的室内导航定位方案是室内导航技术领域重点研究方向之一^[1-2]。在卫星导航拒止的室内环境中,UWB、视觉、激光雷达及惯性导航等方法由于环境约束和自身因素,无法长时间提供高精度的可靠导航定位服务,利用低频旋转磁场的高穿透力和特征矢量方向不变的特性,可为室内等复杂场景提供一种高精度、无积累误差的导航定位方案^[3-4]。通过使用通电线圈或旋转永磁体等人工磁信标可生成规律性的低频旋转磁场,结合磁传感器测量值与相对位置间的数值关系,可以获得高精度的定位解算结果^[5-7]。

目前,针对室内环境下的磁信标定位技术,国内外学者已开展了大量研究,研究内容主要围绕基于磁场强度、磁场矢量和指纹匹配的定位技术 3 个方面展开^[8-14]。Darindra D. Arumugam 等人^[8-9]开发了一种远程低频磁场静态定位技术,通过解耦磁场强度和距离间的关系进行测距,在室内环境下利用两个磁信标实现了高精度的二维定位;Bo We 等人^[10-11]利用在空间中选取一定数量的指纹特征匹配点,记录对应的感应磁场强度,在实际导航中通过匹配测量点和指纹点处的磁场强度来实现目标定位,并结合惯性导航开发了一套 iMag+SLAM 系统,以满足室外和室内环境中精确定位和快速设置的要求;李新年等人^[12-14]根据旋转磁场具有唯一

方向不变的特征矢量的特点,建立了特征矢量与位置间的数学关系,仅依靠磁场矢量便可实现定位功能,在此基础上提出了一种不受传感器姿态误差影响的惯性磁感应定位方法,有效解决了定位过程中磁传感器姿态对结果的影响。然而,上述 3 种方法都存在共同的缺点:需提前确定信标的磁矩信息,对于大小呈正弦变化的磁矩,只有获得整个周期的数据才能确定其大小,这大大降低了定位结果的输出频率,增加了磁信标部署的难度。

为了降低人工磁信标定位系统的部署难度、提高系统的输出频率,本文建立了一种不受磁信标磁矩信息和传感器姿态影响的磁感应矢量夹角观测模型;结合惯性导航的误差模型,提出了一种的惯性磁感动态定位方法,并利用无迹卡尔曼滤波^[15,17](unscented Kalman filter, UKF)算法实现了磁场数据和惯导数据的同步融合,有效提高了导航精度。

1 磁感应定位模型

1.1 基于磁感应矢量夹角的观测模型

人工磁信标定位系统主要由磁场信号发射机、接收机与导航解算模块 3 部分构成,如图 1 所示,磁场信号发射机由两个通入不同频率正弦激励电流的正交线圈构成;接收机由 3 个正交的感应线圈构成,利用 3 个线圈上感应电动势的变化实现对发射机磁场矢量的测量;导航解算模块则根据接收机的磁场矢量测量值进行信号处理,结合导航算法实现对目标点处的快速定位。

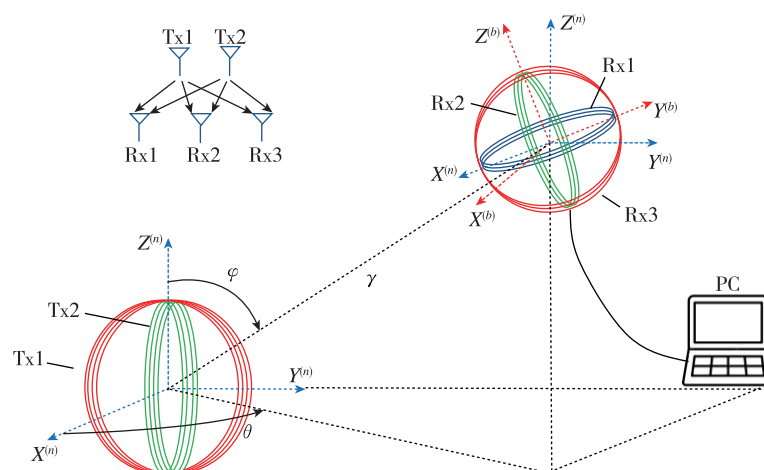


图 1 人工磁信标定位系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of artificial magnetic beacon positioning system

将由双轴正交螺线管构成的磁信标作为磁场信号发射机,分析其磁场分布规律。根据我们之前的研究^[13-14],当接收机与发射机之间的距离 r 大于发射机线圈半径 R 的 3 倍时,可将发射机的线圈等效为两个正交的磁偶极子,根据毕奥-萨伐尔定律,磁偶极子的磁场矢量可以表示为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3 \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \cdot \mathbf{m} \right) \frac{\mathbf{r}}{r} - \mathbf{m}}{r^3} \quad (1)$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,表示空间环境的磁导率; \mathbf{r} 表示接收机与发射机之间的距离; \mathbf{m} 表示磁矩矢量。

双轴磁信标的两个发射线圈 Tx1 和 Tx2 的线圈匝数为 N_C 和 N_S ,磁通面积为 S_C 和 S_S ,分别通入幅值为 I_C 和 I_S 、信号频率为 ω_C 和 ω_S ,且相位相差 60° 的正弦激励电流,根据图 1 和式(1),可以得到线圈 Tx1 和 Tx2 在空间中任意一点处 $\mathbf{P}(r, \varphi, \theta)$ 磁场矢量 \mathbf{B}_C 和 \mathbf{B}_S 的表达式

$$\mathbf{B}_C(r, \varphi, \theta, t) = \frac{\mu_0 M_C}{8\pi r^3} \begin{pmatrix} 6\sin^2\varphi \cos^2\theta - 2 \\ 6\sin^2\varphi \sin\theta \cos\theta \\ 6\sin\varphi \cos\varphi \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_S(r, \varphi, \theta, t) = \frac{\mu_0 M_S}{8\pi r^3} \begin{pmatrix} 6\sin^2\varphi \sin\theta \cos\theta \\ 6\sin^2\varphi \sin^2\theta - 2 \\ 6\sin\varphi \cos\varphi \sin\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(2)和(3)中, $M_C = I_C N_C S_C \sin(\omega_C t)$ 和 $M_S = I_S N_S S_S \sin(\omega_S t + 60^\circ)$ 分别表示发射线圈 Tx1 和 Tx2 的磁矩; φ 和 θ 分别为接收机相对于发射机的俯仰角和方位角。

接收机在实际的测量过程中,任意时刻得到的结果是磁场矢量 \mathbf{B}_C 与 \mathbf{B}_S 的矢量和 \mathbf{B}_{CS} ,且由于接收机的载体坐标系 $x^{(b)} y^{(b)} z^{(b)}$ 与发射机所在坐标系 $x^{(n)} y^{(n)} z^{(n)}$ 不一致,则接收机 3 个线圈得到的磁场矢量 \mathbf{B}'_{CS} 的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{B}'_{CS} &= \mathbf{B}'_C + \mathbf{B}'_S \\ &= \mathbf{C}_n^b (\mathbf{B}_C + \mathbf{B}_S) \\ &= \frac{\mu_0 \mathbf{C}_n^b}{8\pi r^3} \begin{pmatrix} M_C(6\sin^2\varphi \cos^2\theta - 2) + M_S(6\sin^2\varphi \sin\theta \cos\theta) \\ M_C(6\sin^2\varphi \sin\theta \cos\theta) + M_S(6\sin^2\varphi \sin^2\theta - 2) \\ M_C(6\sin\varphi \cos\varphi \cos\theta) + M_S(6\sin\varphi \cos\varphi \sin\theta) \end{pmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

其中, \mathbf{C}_n^b 为 t 时刻从导航参考坐标系到载体坐标系转换的方向余弦阵。

磁感应定位的实现需要获得 \mathbf{B}'_C 和 \mathbf{B}'_S ,由式(4)可知,接收机感应得到的磁场矢量为 \mathbf{B}'_{CS} ,注意到 \mathbf{B}'_{CS} 由频率为 ω_C 和 ω_S 的磁场矢量 \mathbf{B}'_C 和 \mathbf{B}'_S 构

成,则可以通过信号辨识或滤波等方法^[16]提取获得 \mathbf{B}'_C 和 \mathbf{B}'_S 。

分析式(4)可知, \mathbf{B}'_{CS} 的几何意义为空间中任一点处随时间呈椭圆变化的旋转矢量,如图 2 所示,该椭圆平面具有唯一方向不变的法向量 \mathbf{H}'_{CS} ,该法向量可以通过下式进行提取

$$\begin{aligned} \mathbf{H}'_{CS}(r, \varphi, \theta, t) &= \mathbf{B}'_C \times \mathbf{B}'_S \\ &= \frac{\mu_0^2 M_C M_S}{16\pi^2 r^6} \mathbf{C}_n^b \begin{pmatrix} 3\sin\varphi \cos\varphi \cos\theta \\ 3\sin\varphi \cos\varphi \sin\theta \\ 1 - 3\sin^2\varphi \end{pmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

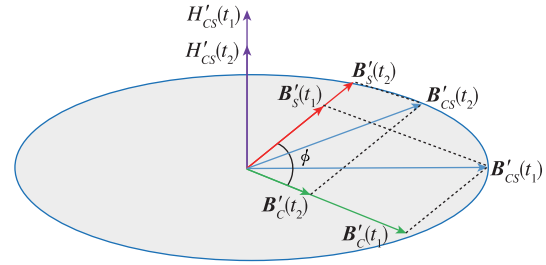


图 2 旋转磁场示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotating magnetic field

图 2 中, \mathbf{B}'_C 和 \mathbf{B}'_S 的夹角大小为 ϕ , $\phi \in [0, \pi]$,且仅与 \mathbf{B}'_C 和 \mathbf{B}'_S 的方向有关,可以通过下式进行提取

$$\begin{aligned} \cos\phi &= \frac{\mathbf{B}'_C \cdot \mathbf{B}'_S}{\|\mathbf{B}'_C\|_2 \cdot \|\mathbf{B}'_S\|_2} \\ &= \frac{(\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_C)^T (\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_S)}{\sqrt{(\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_C)^T (\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_C)} \cdot \sqrt{(\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_S)^T (\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_S)}} \\ &= \frac{3\sin^2\varphi \sin\theta \cos\theta}{\sqrt{(3\sin^2\varphi \cos^2\theta + 1)(3\sin^2\varphi \sin^2\theta + 1)}} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin\phi &= \frac{\|\mathbf{H}'_{CS}\|_2}{\|\mathbf{B}'_C\|_2 \cdot \|\mathbf{B}'_S\|_2} \\ &= \frac{\sqrt{(\mathbf{C}_n^b \mathbf{H}^{CS})^T (\mathbf{C}_n^b \mathbf{H}^{CS})}}{\sqrt{(\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_C)^T (\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_C)} \cdot \sqrt{(\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_S)^T (\mathbf{C}_n^b \mathbf{B}_S)}} \\ &= \frac{\sqrt{4 - 3\cos^2\varphi}}{\sqrt{(3\sin^2\varphi \cos^2\theta + 1)(3\sin^2\varphi \sin^2\theta + 1)}} \quad (7) \end{aligned}$$

式中, $\cos\phi$ 、 $\sin\phi$ 分别为磁感应矢量 \mathbf{B}'_C 、 \mathbf{B}'_S 夹角的余弦值和正弦值,其计算仅依赖于接收机磁场矢量的测量值 \mathbf{B}'_{CS} ,与接收机所在的坐标系 (b) 、发射机的磁矩 M 和磁信标定位系统所处环境的磁导率 μ_0 均无关。将式(6)和(7)由球坐标系转到直角坐标系下

$$\begin{aligned}\cos\phi &= \frac{\mathbf{B}'_C \cdot \mathbf{B}'_S}{\|\mathbf{B}'_C\|_2 \cdot \|\mathbf{B}'_S\|_2} \\ &= \frac{3xy}{\sqrt{(4x^2 + y^2 + z^2)(4y^2 + x^2 + z^2)}}\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\sin\phi &= \frac{\|\mathbf{H}'_{CS}\|_2}{\|\mathbf{B}'_C\|_2 \cdot \|\mathbf{B}'_S\|_2} \\ &= \frac{\sqrt{(4x^2 + 4y^2 + z^2)(x^2 + y^2 + z^2)}}{\sqrt{(4x^2 + y^2 + z^2)(4y^2 + x^2 + z^2)}}\end{aligned}\quad (9)$$

基于式(8)和式(9),可以构建如下观测模型

$$\begin{bmatrix} \cos\phi \\ \sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3xy}{\sqrt{(4x^2 + y^2 + z^2)(4y^2 + x^2 + z^2)}} \\ \frac{\sqrt{(4x^2 + 4y^2 + z^2)(x^2 + y^2 + z^2)}}{\sqrt{(4x^2 + y^2 + z^2)(4y^2 + x^2 + z^2)}} \end{bmatrix}\quad (10)$$

分析式(10)可知,该观测模型直接利用测量得到的磁感应矢量夹角余、正弦值作为量测量,可以配合其他传感器如惯性传感器进行组合导航。

1.2 基于 UKF 的惯性磁感应定位模型

一般情况下,室内环境中使用的低成本 MEMS 惯导系统总是在小范围内运动,因此选择当地直角坐标系作为导航参考坐标系(n 系),导航起点为坐标原点(O),磁信标两正交轴的轴向为 Ox_n 和 Oy_n ,垂直 xOy 平面向上为 Oz_n ,建立惯导系统的误差方程

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\phi}} = -\mathbf{C}_b^n (\boldsymbol{\varepsilon}_r^b + \boldsymbol{\omega}_g^b) \\ \dot{\delta \mathbf{v}}^n = \mathbf{f}_{sf}^n \times \boldsymbol{\phi} + \mathbf{C}_b^n (\mathbf{V}_r^b + \boldsymbol{\omega}_a^b) \\ \dot{\delta \mathbf{p}}^n = \delta \mathbf{v}^n \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_r^b = \boldsymbol{\omega}_{rg}^b \\ \dot{\mathbf{V}}_r^b = \boldsymbol{\omega}_{ra}^b \end{cases}\quad (11)$$

式中, $\boldsymbol{\phi} = [\phi_x \ \phi_y \ \phi_z]$ 为失准角误差; $\delta \mathbf{v}^n = [\delta v_x^n \ \delta v_y^n \ \delta v_z^n]$ 为速度误差; $\delta \mathbf{p}^n = [\delta p_x^n \ \delta p_y^n \ \delta p_z^n]$ 为位置误差; $\boldsymbol{\varepsilon}_r^b = [\varepsilon_{rx}^b \ \varepsilon_{ry}^b \ \varepsilon_{rz}^b]$ 和 $\mathbf{V}_r^b = [\nabla_{rx}^b \ \nabla_{ry}^b \ \nabla_{rz}^b]$ 分别为陀螺仪和加速度计随时间缓慢变化的偏置误差; $\boldsymbol{\omega}_g^b$ 和 $\boldsymbol{\omega}_a^b$ 分别为陀螺仪和加速度计的测量白噪声; $\boldsymbol{\omega}_{rg}^b$ 和 $\boldsymbol{\omega}_{ra}^b$ 分别为陀螺仪和加速度计偏置误差的驱动噪声。

在惯导系统误差方程和磁感应矢量夹角观测模型的基础上,构建惯性磁感应定位系统的状态空间模型

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{F}_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{V}_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{F}(\mathbf{X}_k) + \mathbf{W}_k \end{cases}\quad (12)$$

其中, $\mathbf{X}_k = [\boldsymbol{\phi}_k \ \delta \mathbf{v}_k^n \ \delta \mathbf{p}_k^n \ \boldsymbol{\varepsilon}_b \ \mathbf{V}_b]^T$ 为系统状态变量, $\mathbf{F}_{k/k-1}$ 为目标状态矢量状态转移矩阵, \mathbf{V}_{k-1} 和 \mathbf{W}_k 分别为状态噪声和量测噪声。 $\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$ 为量测方程,具体形式见式(10)。

$\mathbf{F}_{k/k-1} =$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{T}_s \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{T}_s (\mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b \times) & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_s \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_s \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}\quad (13)$$

根据式(12)可知,利用磁感应矢量夹角辅助惯导对动态目标进行定位的模型是非线性的。目前,针对非线性模型的滤波方法,常用的有扩展卡尔曼滤波(EKF)和无迹卡尔曼滤波(UKF)^[17]。EKF 算法基本思想是先对非线性函数进行泰勒展开,然后保存展开式的一阶项,忽略其余高阶项,将非线性系统近似为线性系统,最后再完成卡尔曼滤波估计;UKF 是一种对后验概率密度进行近似而得到的滤波算法,可直接对系统导航参数进行估计,从而避免对非线性量测方程线性化,保证了系统具有较高的定位精度,因此本文采用 UKF 完成对惯导和磁场数据的融合。

针对本文建立的惯性磁感应定位模型,给出以下 UKF 滤波流程。

Step1 初始化状态量和协方差矩阵

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{E}(\mathbf{x}_0) \\ \mathbf{P}_0 = \mathbf{E}[(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_0)^T] \end{cases}\quad (14)$$

Step2 进行 Sigma 采样,计算采样点

$$\mathbf{X}_{k-1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \sqrt{(n+\tau)\mathbf{P}_{k-1}} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} - \sqrt{(n+\tau)\mathbf{P}_{k-1}} \end{bmatrix}\quad (15)$$

Step3 时间更新

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k/k-1} = \mathbf{F}(\mathbf{X}_{k-1}) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,e} \hat{\mathbf{x}}_{i,k/k-1} \\ \mathbf{P}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,c} (\hat{\mathbf{x}}_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \cdot (\hat{\mathbf{x}}_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})^T \end{cases}\quad (16)$$

式中, $W_{i,e}$ 和 $W_{i,c}$ 分别为 UT 变换中计算 Sigma 采样点对应的均值和协方差权值,定义为

$$\begin{cases} W_{0,e} = \frac{\tau}{n + \tau} \\ W_{0,c} = \frac{\tau}{n + \tau} + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_{i,e} = W_{i,c} = \frac{\tau}{2(n + \tau)}, i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\tau = \alpha^2(n + \gamma) - n$ 为缩放比例参数; n 为状态量的维数, 本文中 $n = 15$; α 控制由非线性函数带来的高阶影响, 一般取 $e^{-4} \leq \alpha \leq 1$, $\gamma = 3 - n$, $\beta = 2$ 。

Step4: 量测更新

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{k/k-1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_{k/k-1}) \\ \hat{\mathbf{Z}}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,e} \mathbf{Z}_{i,k/k-1} \end{cases} \quad (18)$$

Step5: 状态和协方差估计更新

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{Z_k Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,c} (\mathbf{Z}_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k) (\mathbf{Z}_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k)^T \\ \mathbf{P}_{\chi_k Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,c} (\mathbf{x}_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k) (\mathbf{Z}_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_k)^T \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{\chi_k Z_k} \mathbf{P}_{Z_k Z_k}^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_{k/k-1}) \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{Z_k Z_k} \mathbf{K}_k^T \end{cases} \quad (20)$$

2 实验验证

通过上述分析, 本文建立了基于双轴磁信标的磁感应矢量夹角观测模型和基于 UKF 的惯性磁感应定位模型, 本章将通过实验的方式分别对两个模型的有效性和精度进行验证。由于实际实验过程中很难给出运动目标的真实动态轨迹, 因此本章将采用数值仿真的方式对基于 UKF 的惯性磁感应定位模型进行仿真验证, 通过对比真实轨迹和实际运动轨迹, 从而达到验证该模型精度的目的。

2.1 基于磁感应矢量夹角的观测模型实验验证

本节将利用如图 3 所示的双轴磁信标实验系统测试基于磁感应矢量夹角观测模型的精度和稳定性, 该系统由激励电流生成器、功率放大器、双轴磁场发射机、三轴矢量磁传感器和磁场数据处理模块 5 个单元组成。

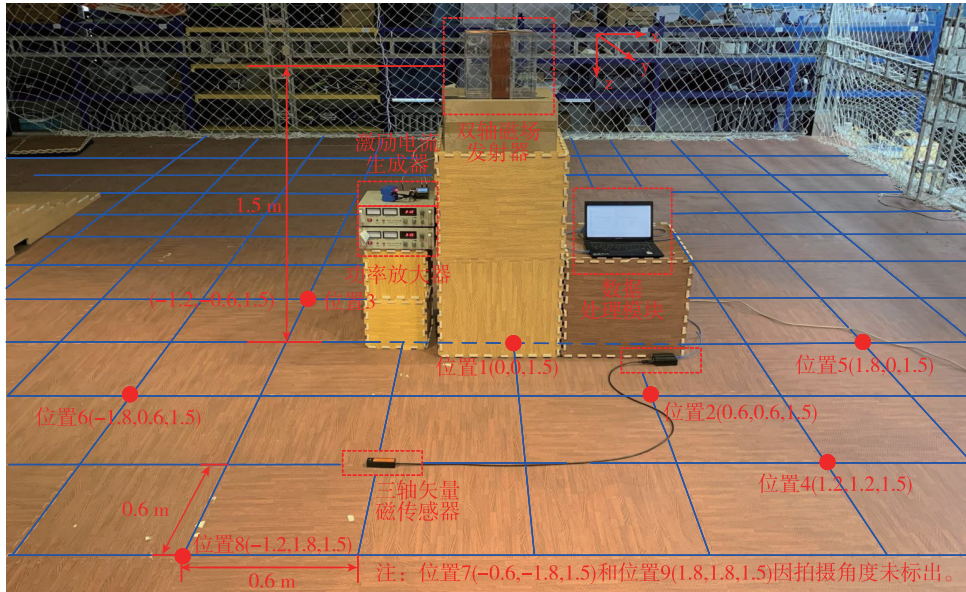


图 3 磁信标实验系统

Fig. 3 Magnetic beacon experimental system

实验时, 首先确定导航参考坐标系 (n) 和测量点坐标, 本实验以双轴磁场发射机的几何中心为坐标原点 (O), 两正交轴指向分别为 x 和 y 方向, 垂直 xOy 平面指向下为 z 方向, 在该坐标系下按照接收机与发射机间距离由近及远的原则选择 9 个实验点, 测得其坐标值, 位置点和坐标如图 3 所示; 其次,

磁场发射机的两个线圈中分别通入幅值 2 A、频率 20 Hz 和 30 Hz、相位相差 60° 的激励电流, 此时空间中生成旋转磁场; 然后, 将感知范围为 $0.1 \sim 10\,000$ nT 的三轴矢量磁传感器分别放置于 9 个实验点, 测得实验点处的磁场数据; 最后, 利用式 (8) 和 (9) 分别计算出磁感应矢量夹角余、正弦值的理

论值和实验值。为了测试传感器姿态和环境中遮挡物对精度的影响以及实验结果的稳定性,设计以下 3 组实验,并且每组实验重复 10 次。

实验 1:将磁传感器分别放置于 9 个实验点处,保证发射线圈和磁传感器处于同一坐标系下,两者间无遮挡物,测量此时磁场数据。

实验 2:控制磁传感器相对于发射线圈的俯仰角、横滚角和航向角分别为 $20^\circ, 30^\circ$ 和 40° ,其他同实验 1。

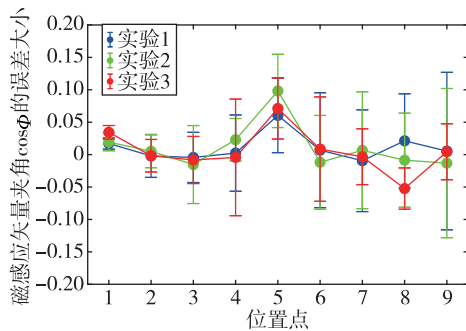
实验 3:在发射线圈上覆盖住一个木箱,其他同实验 1。

实验结果如图 4 所示,从误差图中可知,不同位置处磁感应矢量夹角余弦值和正弦值的理论与 3 组实验值之间的最大误差值均小于 0.1,且 3 组实验值之间的误差值小于 0.05,说明传感器姿态以及环境中遮挡物对磁感应定位结果并无影响;从误差棒图中可以看出,每组实验重复 10 次的标准差小于 0.08,离散程度较小,说明实验结果具有较高的稳

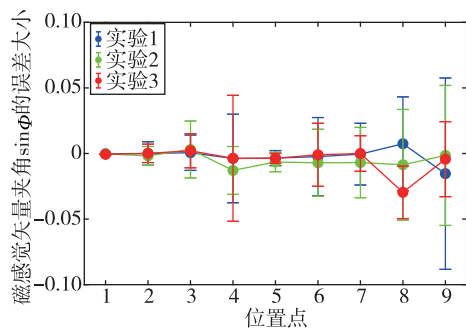
定性,且变化的磁矩对磁感应定位并无影响。需注意的是随着接收机和发射机之间距离的增大,数据的离散程度有增大的趋势,这是由于磁场信号强度随距离衰减导致信噪比下降引起的,说明距离是影响测量精度的重要因素。

2.2 惯性磁感应定位模型仿真验证

本节将通过仿真的方式验证基于 UKF 的惯性磁感应定位模型。使用无人车为载体进行仿真验证,无人车的运动轨迹可通过数值仿真生成,其运动过程包括静止、加速、匀速、爬升、转弯及减速等。磁场数据由双轴磁信标定位模型产生,将干扰磁场设置为约 0.5 nT 的白噪声磁场,磁传感器数据输出频率为 100 Hz。惯性传感器指标为:1)MEMS 陀螺仪的常值漂移为 $8^\circ/h$,角度随机游走为 $0.01^\circ/\sqrt{h}$;2)MEMS 加速度计的偏置误差为 $10^{-4}g$,加速度随机游走为 $10^{-8}g/\sqrt{Hz}$;3)惯性传感器输出频率为 100 Hz。根据以上设置分别得到磁场和惯导数据,结合基于 UKF 的惯性磁感应定位模型进行数值仿真,得到的结果如图 5~图 7 所示。



(a)



(b)

图 4 不同位置处磁感应矢量夹角余弦值和正弦值的误差大小及稳定性分析结果图

Fig. 4 Error and stability analysis result of the cosine and sine values of the included angle of the magnetic-induction vector at different positions

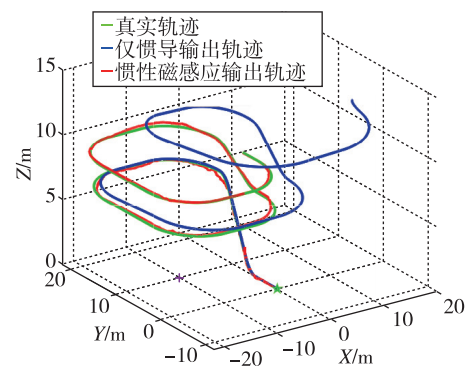


图 5 基于 UKF 的惯性磁感应定位结果
Fig. 5 Results of inertial magnetic-induction positioning based on UKF

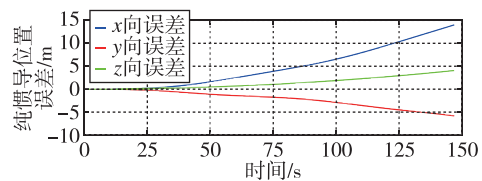


图 6 纯惯性位置误差图

Fig. 6 Inertia position error diagram

从仿真的结果可知,相较于仅依靠惯性导航,无人车使用基于 UKF 的惯性磁感应定位方法具有

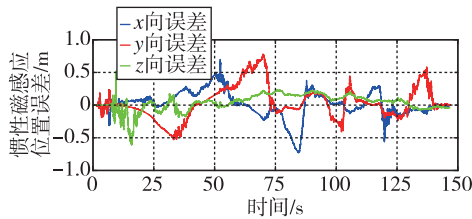


图7 惯性磁感应组合导航位置误差图

Fig. 7 Position error diagram of inertial magnetic induction integrated navigation

更高的定位精度:全过程中 x 、 y 、 z 方向上的位置误差均小于 0.75 m,有效地抑制了惯导的发散。

3 结论

针对卫星拒止条件下的室内导航问题,本文结合磁信标定位系统及 MEMS 惯性传感器提出了一种不受传感器姿态和磁信标磁矩影响的惯性磁感应定位方法,并通过实验与仿真结合的方式验证了方法的有效性。主要内容有:

1)在双轴人工磁信标磁场分布规律的基础上详细推导并建立了不受传感器姿态和磁信标磁矩影响的磁感应矢量夹角观测模型,通过实验验证了模型的有效性。

2)提出了一种基于 UKF 的惯性磁感应定位方法,实现了惯导数据与磁感应数据的融合。利用数值仿真的方式进行验证,结果表明,该方法能有效地抑制惯性导航的发散,适用于较高精度的室内导航定位。

本文的研究成果对惯性磁感应组合导航系统在室内场景下的应用具有较好的理论价值和实践价值,但受限于磁信标有效作用域的大小,目前该套系统的使用范围有限,后期可通过提高磁信标磁场覆盖范围和磁传感器精度的方式扩大惯性磁感应组合导航系统的使用范围。

参考文献

- [1] KIM H S, SEO W, BAEK K R. Indoor positioning system using magnetic field map navigation and an encoder system[J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 651.
- [2] 郝廉效,余科根,林贻若. 基于邻近点特征的地磁室内定位方法及性能分析[J]. *导航定位与授时*, 2022(003):009.
HAO Lianxiao, YU Kegen, LIN Yiruo. Geomagnetic indoor positioning method and performance analysis based on proximity points feature[J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2022(003):009(in Chinese).
- [3] ALQAHTANI E J, ALSHAMRANI F H, SYED H F, et al. Survey on algorithms and techniques for indoor navigation systems[C]//2018 21st Saudi Computer Society National Computer Conference (NCC). IEEE, 2018: 1-9.
- [4] ABRUDAN T E, XIAO Z, MARKHAM A, et al. Underground incrementally deployed magneto-inductive 3D positioning network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(8):4376-4391.
- [5] HU C, SONG S, WANG X, et al. A novel positioning and orientation system based on three-axis magnetic coils[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(7): 2211-2219.
- [6] Pasku V, De Angelis A, Dionigi M, et al. A positioning system based on low-frequency magnetic fields[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 63(4): 2457-2468.
- [7] ZHENG Y, LI Q, WANG C, et al. Magnetic-based positioning system for moving target with feature vector[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 105472-105483.
- [8] ARUMUGAM D D, LITTLEWOOD P, PENG N, et al. Long-range through-the-wall magnetoquasistatic coupling and application to indoor position sensing[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(3): 507-511.
- [9] ARUMUGAM D D. Decoupled range and orientation sensing in long-range magnetoquasistatic positioning[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 14: 654-657.
- [10] WEI B, TRIGONI N, MARKHAM A. iMag: accurate and rapidly deployable inertial magneto-inductive localisation[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018: 99-106.
- [11] WEI B, TRIGONI N, MARKHAM A. iMag+: an accurate and rapidly deployable inertial magneto-inductive SLAM system[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, 21(10): 3644-3655.
- [12] 谢阳光,李清华,解伟男,等. 基于双磁偶极子的螺线管磁场建模分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(5): 625-630.
XIE Yanguang, LI Qinghua, XIE Weinan, et al. Solenoid magnetic field modeling based on dual magnetic dipoles[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(5): 625-630(in Chinese).
- [13] LI Q, LI X, WANG C, et al. An inertial magneto-Inductive positioning system based on GWO-PF algo-

- rithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-10.
- [14] 李新年, 李清华, 王常虹, 等. 不受姿态误差影响的惯性/磁感应融合定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(4): 469-475.
- LI Xinnian, LI Qinghua, WANG Changhong, et al. An inertial magnetic-induction positioning fusion method independent of attitude errors[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(4): 469-475 (in Chinese).
- [15] 程建华, 王诺, 尚修能. 基于改进 UKF 的组合导航系统航向角估计方法研究[J]. 导航定位与授时, 2020.
- CHENG Jianhua, WANG Nuo, SHANG Xiuneng. Research on course angle estimation method of integrated navigation system based on improved UKF[J]. Navigation Positioning & Timing, 2020(in Chinese).
- [16] 王煜. 基于特征矢量的磁信标定位技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019:24-27.
- WANG Yu. Magnetic beacon positioning technology based on feature vector[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019:24-27(in Chinese).
- [17] GIANNITRAPANI A, CECCARELLI N, SCORTECCI F, et al. Comparison of EKF and UKF for spacecraft localization via angle measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 75-84.

(编辑: 孟彬)