

文章编号 1004-924X(2011)08-1867-07

数字磁罗盘的全姿态罗差补偿

刘仁浩*, 王 华

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘要:针对现有磁罗盘罗差补偿方法成本高、效率低和全姿态补偿能力不足的问题,提出了一种基于几何变换的全姿态罗差补偿方法。首先,根据外磁干扰对磁传感器采样值的影响,建立了几何变换罗差补偿模型,将罗差补偿参数由12个减少到9个。其次,将牛顿法算子引入到粒子群算法中建立了混合粒子群优化算法,采用粒子群算法选取优化参数初始值,以牛顿法算子快速逼近最优值。最后,使用提出的混合粒子群优化算法对几何变换参数进行优化求解,并利用几何变换补偿模型对磁罗盘磁航向测量误差进行补偿。实验结果表明,采用该补偿方法无需外部辅助航向姿态信息,可在3 min内实现全姿态罗差补偿,并将磁航向测量误差降低为补偿前的1/8~1/10,在罗差补偿精度和速度上优于传统补偿方法,满足了航姿系统的需求。

关键词:数字磁罗盘;罗差补偿;混合粒子群优化算法;参数优化

中图分类号: V241.61 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1867

All attitude magnetic deviation compensation for digital magnetic compass

LIU Ren-hao*, WANG Hua

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 510641, China)

* Corresponding author, E-mail: liurenhao2004@163.com

Abstract: To overcome the shortcomings of the existing magnetic deviation compensation methods in high costs, low efficiency and insufficient tilting compensation ability, a new method based on geometric transformation was proposed to compensate the attitude magnetic deviation of the digital magnetic compass. Firstly, the effect of the magnetic interference on the output of a magnetic sensor was analyzed and a geometric transformation model for the compass deviation was established to reduce the number of magnetic deviation parameters from 12 to 9. Then, a hybrid algorithm for solving these 9 parameters was proposed, in which the Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm was taken to adjust the initial value and the Newton algorithm was used to accelerate the convergence process. Finally, the compensation method was used to compensate the magnetic heading error. The experimental results show that the method can achieve the all attitude magnetic deviation compensation without other assisting magnetic heading information, the compensation time is less than 3 min and the magnetic heading error is 1/8~1/10 that before compensation. The method is prior to traditional method

收稿日期:2011-01-06;修订日期:2011-03-18.

基金项目:航天科技重点创新基金资助项目(No. CASC0105)

in the speed and accuracy and satisfies the requirement of the system for attitude and heading reference.

Key words: digital magnetic compass; magnetic deviation compensation; hybrid particle swarm optimization; parameter optimization

1 引言

数字磁罗盘以其在体积、功耗及精度方面的优势在卫星、无人机尤其是微小型无人机的航姿系统中得到广泛应用,不过易受外界磁干扰,制约了其应用和发展,因此,研究磁罗盘航向误差(罗差)补偿技术是提高其使用精度的关键技术之一。

现有的磁罗差补偿方法主要有多传感器信息融合法、给定基准法和椭圆拟合法^[1]。多传感器信息融合法是将磁罗盘磁传感器与 GPS 或惯性仪表的输出信息进行补偿滤波,以校准传感器的测量值,具有在线实时补偿能力^[2-3];给定基准法分为参数法、曲线拟合以及神经网络法等^[4-5],这类方法利用外部辅助姿态信息实现全姿态罗差补偿,思想直观且补偿精度高;椭圆拟合法不需要外部辅助设备,仅根据椭圆假设自动拟合出罗差补偿参数,对水平和小倾角状态下的磁罗盘补偿效果明显^[6-8]。综上可知,现有的补偿方法主要通过实时校准传感器的测量值、优化补偿模型参数等手段减小系统误差,虽在一定程度上改善了磁罗盘的航向测量精度,但也存在着系统成本高、效率低和非水平状态补偿能力不足的问题^[9]。考虑到实际工程对低成本数字磁罗盘在非实验室环境下实现全姿态罗差快速自补偿的需求,研究一种效率更高且自主性更强的全姿态罗差补偿方法很有必要。

在前人工作基础上,本文提出一种利用几何变换实现磁罗盘全姿态罗差自补偿的方法。该方法将罗差补偿过程转化为将椭球面还原成圆球面的几何变换过程,并尝试从非线性优化的角度得到该几何变换参数的最优值,从而实现全姿态罗差补偿。最后通过实验,对所提出的几何变换罗差补偿法与传统的给定基准法、椭圆拟合法在补偿时间和精度两方面进行比较,结果证明了本方法的有效性和优越性。

2 罗差分析与几何变换补偿方法

2.1 罗差分析

某航向姿态下磁罗盘三轴磁传感器的测量值为 $\mathbf{H}_s = (H_{sx}, H_{sy}, H_{sz})^T$, 地球磁场在各轴的分量为 $\mathbf{H}_m = (H_{mx}, H_{my}, H_{mz})^T$ 。当磁罗盘固定在载体上时,磁航向测量将受到周围铁磁物质的影响,其误差模型可由 Poisson 方程描述^[10]:

$$\mathbf{H}_s = \mathbf{K} \cdot \mathbf{H}_m + \mathbf{P}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1+a & b & c \\ d & 1+e & f \\ g & h & 1+k \end{bmatrix}$, $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$ 。 \mathbf{K} 是

软磁材料、传感器不正交以及电路等因素引起的,统称为软磁干扰系数; \mathbf{P} 由硬磁材料、电路电流偏置等决定,统称为硬磁干扰系数。

磁罗盘在小地域内做任意姿态运动时,地磁场矢量的标量值 $\|\mathbf{H}_m\|$ 为固定值。若不考虑外磁干扰,则三轴磁传感器的测量值 \mathbf{H}_s 满足下述方程:

$$\mathbf{H}_s^T \cdot \mathbf{H}_s = \|\mathbf{H}_m\|^2. \quad (2)$$

上式表明 \mathbf{H}_s 的轨迹是一个以 $\|\mathbf{H}_m\|$ 为半径的地磁圆球面。实际工程应用中,由于各种软磁、硬磁干扰的存在,式(2)所描述的圆球面将在三维空间内偏移,其形状也将畸变为椭球,该椭球方程为:

$$\mathbf{H}_s^T \mathbf{K}_0 \mathbf{H}_s - 2\mathbf{P}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{H}_s + \mathbf{P}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{P} = \|\mathbf{H}_m\|^2. \quad (3)$$

传统补偿方法是利用无磁转台或方位姿态仪表给定航向和姿态基准信息,通过试验确定 \mathbf{K} 和 \mathbf{P} 中的 12 个参数 $(a, b, c, d, e, f, g, h, k, p, q, r)$, 从而补偿外界磁干扰,得到地磁信息的修正值:

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{K}^{-1} \cdot (\mathbf{H}_s - \mathbf{P}). \quad (4)$$

上述补偿方法存在的问题是需要专门设备,且调试工作量较大。

2.2 几何变换补偿原理

当存在外磁干扰时,三轴磁传感器在磁罗盘 j 个姿态下的测量值为 \mathbf{H}_{s_i} , $i=1, 2, \dots, j$ 。 \mathbf{H}_{s_i} 分布在式(3)描述的椭球表面上。根据空间解析几何理论,三维空间内任意椭球面可经平移、旋转和

伸缩变换为圆球面,如图 1 所示。令 x_0, y_0, z_0 为沿 3 个主轴的平移量; v_1, v_2, v_3 为沿各主轴方向的伸缩因子; α, β, γ 为绕各主轴的旋转角。平移、伸缩和旋转变换矩阵分别表示为 \mathbf{X}_0, \mathbf{V} 和 \mathbf{T} :

$$\mathbf{X}_0 = [x_0 \quad y_0 \quad z_0]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

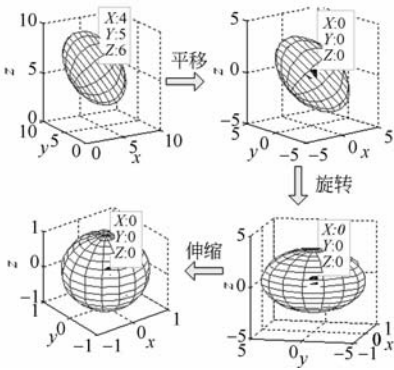


图 1 几何变换示意图

Fig. 1 Schematic of geometric transformation

同理, \mathbf{H}_{si} 亦可经上述几何变换还原为 \mathbf{H}_{mi}' :

$$\mathbf{H}_{mi}' = \mathbf{V} \cdot \mathbf{T} \cdot (\mathbf{H}_{si} - \mathbf{X}_0), \quad (8)$$

则 \mathbf{H}_{mi}' 距地磁圆球面的几何距离和为:

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^j \left| \sqrt{\mathbf{H}_{mi}'^T \mathbf{H}_{mi}'} - \|\mathbf{H}_{mi}'\| \right|, \quad (9)$$

式中, $\mathbf{X} = (\alpha, \beta, \gamma, v_1, v_2, v_3, x_0, y_0, z_0)^T$ 为参数向量。显然 $L(\mathbf{X})$ 越小, 说明 \mathbf{H}_{mi}' 越靠近地磁圆球面, 补偿效果也越好, 则参数优化的目标函数可定义为:

$$F(\mathbf{X}) = \min L(\mathbf{X}). \quad (10)$$

使 $F(\mathbf{X})$ 取最小值的 \mathbf{X} 即为最优罗差补偿参数, 这种还原过程就是罗差补偿的过程。 \mathbf{X} 确定后, 可按式(8)将椭球面上含有误差的 \mathbf{H}_{si} 还原为地磁球面上无误差的 \mathbf{H}_{mi}' 。结合磁罗盘俯仰角 θ 和滚转角 ϕ , 即可按下式得到补偿后的真实磁航向角 ψ :

$$\begin{bmatrix} H_{Lx} \\ H_{Ly} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \end{bmatrix} \cdot \mathbf{H}_{mi}'. \quad (11)$$

$$\psi = \arctan(H_{Ly} / H_{Lx}). \quad (12)$$

几何变换法补偿时仅需载体变姿态转动, 无

需惯性仪表、无磁转台等外部辅助设备提供基准航向姿态信息, 补偿过程既节约成本又简单高效。

3 混合粒子群优化算法设计

3.1 标准粒子群优化算法

最小二乘法是参数优化的主要手段之一, 但当优化对象具有强非线性时, 算法易发散而得不到最优值^[11]。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于群体智能的优化算法, 已在非线性优化领域得到广泛应用^[12]。标准 PSO 的速度与位置运动方程如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega^{k+1} v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \\ \omega^k = 0.9 - k / (2k_{\max}) \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$; x_{id}, v_{id} 是第 i 个粒子在 d 维空间的位置与速度; 迭代次数 $k=1, 2, \dots, k_{\max}$; D 是搜索空间的维数; 学习因子 $c_1=c_2=2$, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 内的随机数; ω^k 为惯性权值。

粒子群优化算法的优点是思想直观、对迭代初值要求不严格, 工程上易实现, 但算法后期存在收敛速度慢、易发散等缺点。

3.2 牛顿法

牛顿法是一种使用导数的算法, 它每一步的迭代方向都是沿着当前函数值下降的方向。根据牛顿法, 优化目标函数的梯度 $\nabla F(\mathbf{X})$ 、黑塞矩阵 $H(\mathbf{X})$ 和优化参数的迭代公式分别是:

$$\nabla F(\mathbf{X}) = \left[\frac{\nabla F}{\partial x_1} \dots \frac{\nabla F}{\partial x_D} \right]^T, \quad (14)$$

$$H(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \partial^2 F / \partial x_1^2 & \cdots & \partial^2 F / (\partial x_1 \partial x_D) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial^2 F / (\partial x_D \partial x_1) & \cdots & \partial^2 F / \partial x_D^2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{X}^{l+1} = \mathbf{X}^l - \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{X}) \nabla F(\mathbf{X}), \quad (16)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, n$ 为迭代次数, 迭代终止条件是:

$$\|\nabla F(\mathbf{X})\| \leq \varepsilon. \quad (17)$$

牛顿法具有快速性和精确性, 但其有效性严重依赖迭代初始值的选取。

3.2 混合 PSO 算法

针对粒子群优化算法和牛顿法的优缺点, 结合本文的几何变换参数优化问题, 提出如下混合算法:

(1) 采样磁罗盘 j 个姿态下三轴磁传感器的测量值 $\mathbf{H}_{si} = (H_{xsi}, H_{ysi}, H_{zsi})^T, i = 1, 2, \dots, j$ 。根据边界约束确定几何变换参数 \mathbf{X} 中第 d 维参数的位置极值 x_d^{\max} 和 x_d^{\min} , 进而得到速度极值 v_d^{\max} 和 v_d^{\min} :

$$\begin{cases} v_d^{\max} = (x_d^{\max} - x_d^{\min}) \\ v_d^{\min} = (x_d^{\min} - x_d^{\max}) \end{cases}. \quad (18)$$

(2) 设置牛顿法的迭代精度 ε 和 PSO 算法的最大迭代次数 k_{\max} ; 随机产生 n 个粒子的初始位置和初始速度值:

$$\begin{cases} x_d^0 = x_d^{\min} + r(x_d^{\max} - x_d^{\min}) \\ v_d^0 = v_d^{\min} + r(v_d^{\max} - v_d^{\min}) \end{cases}, \quad (19)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; r 是 $[0, 1]$ 内的随机数。

(3) 将 $L(\mathbf{X})$ 作为适应度函数, 计算各粒子的历史最优位置 $P_{ibest} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$ 和粒子群的历史最优位置 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})^T$;

(4) 以 P_g 作为牛顿法迭代的初始点, 使用式 (16) 进行局部搜索, 当满足式 (17) 的终止条件时搜索停止, 并将搜索到的粒子记为 P_g' ;

(5) 以 P_g' 代替 P_g , 按式 (13) 对每个粒子的位置与速度进行更新;

(6) 若满足 PSO 算法终止条件 $k \geq k_{\max}$, 则结束运算, 并将 P_g' 作为几何变换参数的最优值输出; 否则转至步骤 3 继续搜索混合寻优。

上述混合粒子群优化算法将每一代粒子群的最优粒子作为牛顿法算子的迭代初始值, 而后再将该算子的迭代结果作为下一代粒子群的全局最优位置参与粒子进行更新。该优化算法既具有牛顿

法的快速收敛性又保留了粒子群算法的智能寻优能力。

4 罗差补偿实验与结果分析

4.1 罗差补偿速度对比实验

首先, 使用本文的几何变换法对磁罗盘进行罗差补偿。手持数字磁罗盘任意变换方位姿态, 同时自动采集 40 组不同姿态下三轴磁传感器的测量值 $\mathbf{H}_{si} = (H_{xsi}, H_{ysi}, H_{zsi})^T (i = 1, 2, \dots, 40)$, 如图 2 所示。根据地磁图查得本地地磁场强度 $\mathbf{H}_m = 5.4 \times 10^{-5} \text{ T}$ (北京地区), 分别采用标准 PSO 算法和混合 PSO 算法优化罗差补偿参数 (几何变换参数)。设置牛顿法种群迭代精度 $\varepsilon = 10^{-4}$, PSO 算法的粒子种群数 $n = 20$, 最大迭代次数 $k_{\max} = 100$ 。两种算法的收敛性能如图 3 所示, 显然混合 PSO 算法在收敛速度和精度方面都优于标准 PSO 算法, 具有更明显的改良态势。

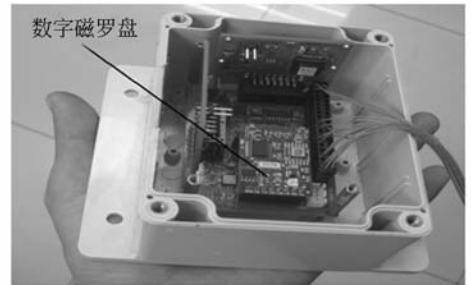


图 2 磁罗盘数据采集过程

Fig. 2 Data acquisition process of magnetic compass

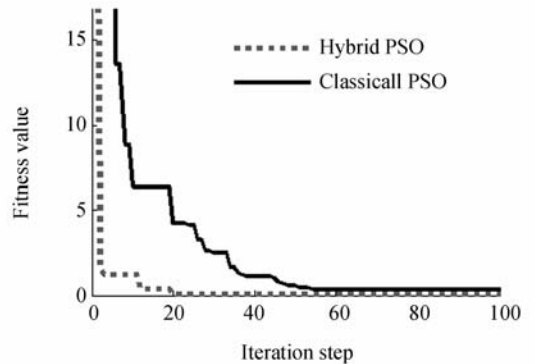


图 3 混合 PSO 算法和标准 PSO 算法的收敛性对比图
Fig. 3 Comparison of convergence curves using hybrid PSO and classical PSO

经 20 次迭代后, 混合 PSO 算法的罗差补偿

参数收敛于最优位置: $\mathbf{X} = (1.023^\circ, -0.802^\circ, 0.416^\circ, 1.172, 1.023, 4.0983, 2.4262, -2.1381, 5.3148)^\top$ 。如图 4 所示,补偿前的三轴磁传感器测量值 \mathbf{H}_{si} 离散地分布于地磁圆球面内外。将 \mathbf{X} 代入式(8)补偿三轴磁传感器的测量误差,补偿后的 \mathbf{H}_{si} 紧密地分布在地磁圆球面上,如图 5 所示。

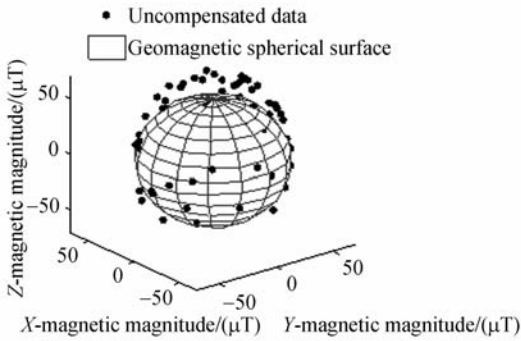


图 4 补偿前三轴磁传感器测量值分布图

Fig. 4 Uncompensated data from three-axis magnetometer plotted on geomagnetic spherical surface

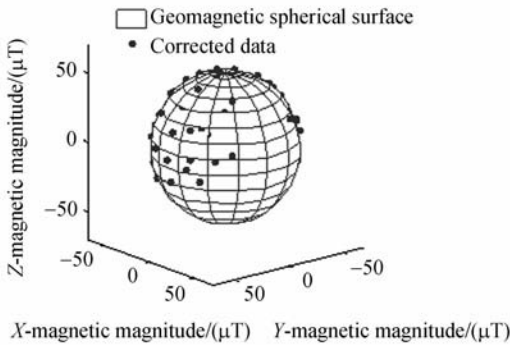


图 5 补偿后三轴磁传感器测量值分布图

Fig. 5 Corrected data from three-axis magnetometer plotted on geomagnetic spherical surface

将磁罗盘放在无磁位置转台上,再分别按传统的给定基准法^[5]和椭圆拟合法^[7]进行罗差补偿,两种方法均使用转台与磁传感器的 40 组测量值拟合补偿参数,其中椭圆拟合法采用自动数据采集方式,给定基准法只能采用手动数据采集方式。上述 3 种补偿方法的时间开销如表 1 所示,给定基准法由于操作复杂而耗时较长,几何变换法和椭圆拟合法的时间开销基本相同,在补偿快速性上本文方法优于给定基准法。

表 1 3 种补偿方法的时间开销

Tab. 1 Time consumption of compensation methods

补偿方法	几何变换法	给定基准法	椭圆拟合法
时间开销/min	3	38	2

4.2 补偿精度对比实验

分别调整转台倾角至 0, 20 和 50°, 每种状态均以 20°为间隔旋转一周,比较上述 3 种方法补偿前后的磁航向剩余误差。如图 6~8 所示, ψ 为转台磁航向角; $\Delta\psi_0$ 为补偿前的剩余误差; $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2$ 和 $\Delta\psi_3$ 分别表示几何变换法、给定基准法和

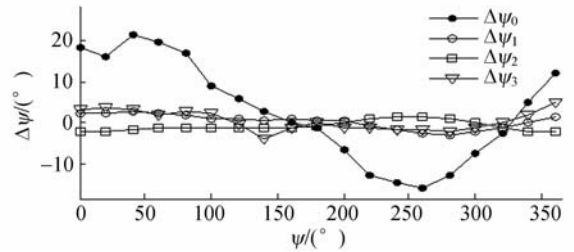


图 6 倾角为 0°时的磁航向剩余误差

Fig. 6 Residual heading errors before and after compensations with tilt angle of 0°

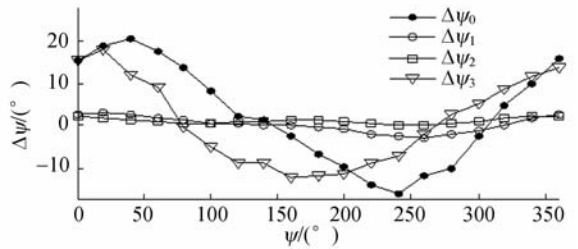


图 7 倾角为 20°时的磁航向剩余误差

Fig. 7 Residual heading errors before and after compensations with tilt angle of 20°

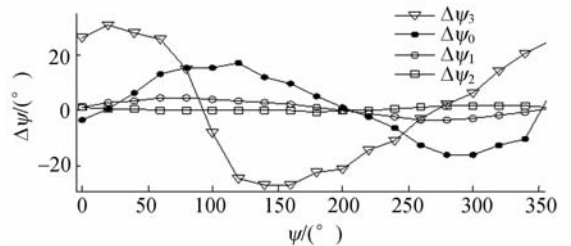


图 8 倾角为 50°时的磁航向剩余误差

Fig. 8 Residual heading errors before and after compensations with tilt angle of 50°

椭圆拟合法的剩余误差。在 3 种转台倾角下, $\Delta\psi_0, \Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \Delta\psi_3$ 最大值如表 2 所示。结果表明,在水平和倾斜状态下,本文方法与给定基准法的补偿精度相当,具有全姿态罗差补偿能力,优于椭圆拟合法。

表 2 不同转台顺序下的剩余误差最大值

Tab. 2 Max values of residual heading errors with different tilts(°)

转台倾角	$\Delta\psi_0$	$\Delta\psi_1$	$\Delta\psi_2$	$\Delta\psi_3$
0	22.89	2.18	1.88	2.48
20	21.52	2.28	2.16	18.2
50	19.43	2.42	2.28	31.2

5 结 论

为提高数字磁罗盘的全姿态磁航向测量精

度,研究了任意姿态下外磁干扰对磁罗盘三轴磁传感器测量值的影响,进而提出一种几何变换罗差补偿方法。该方法把罗差补偿过程转化为将椭圆面还原到圆球面的几何变换过程,并采用基于粒子群初始值选取和牛顿法局部加速收敛的混合粒子群优化算法逼近几何变换参数的最优值,从而实现罗差的快速自动补偿。相比常规补偿法,本文方法将待求解的补偿参数由 12 个减少到 9 个,且不需要外部提供基准参考信息,仅需手持载体变倾斜角转动即可,操作简单且工程实用性更强,有利于提高补偿的精度和速度。实验结果证明:本方法可在 3 min 内实现全姿态罗差补偿,使倾斜和水平状态下的磁罗盘磁航向测量误差分别降低至未补偿前的 1/8~1/10。在全姿态罗差补偿精度和速度等综合性能上明显优于传统补偿方法,能够满足航姿系统的使用需求。

参考文献:

- [1] 孙宏伟,房建成,李艳. 椭圆拟合方法在磁罗盘罗差校准中的应用[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(12): 3034-3039.
SUN H W, FANG J C, LI Y. Application of ellipse fitting method to calibration of magnetic compass deviation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):3034-3039. (in Chinese)
- [2] 任爱爱,孙永荣,胡应东. 无人机航向测量抗差补偿滤波技术研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5): 34-39.
RENG A A, SUN Y R, HU Y D. Study on robust compensation filter of heading [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(5):34-39. (in Chinese)
- [3] CHEN W, CHEN R ZH, CHEN Y W T SAI C L, et al.. An adaptive calibration approach for a 2-axis digital compass in a low-cost pedestrian navigation system [C]. *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology, Austin, I2MTC*, 2010:1392-1397.
- [4] 马斌良,黄玉美,史恩秀. 基于神经网络代数算法的电子罗盘的标定[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2304-2309.
MA B L, HUANG Y M, SHI E X. Calibration of electronic compass based on neural network algebra algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(11):2304-2309. (in Chinese)
- [5] KWON W, ROH K S, SUNG H K. Particle filter-based heading estimation using magnetic compasses for mobile robot navigation [C]. *Orland: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics, ICRA*, 2006:2705-2712.
- [6] YE P, ZHAI CH R, DU G, et al.. Experiment evaluation of rapid error compensation for magnetic compass in underwater vehicle [C]. *China: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, P. R. ICMA*, 2009:4880-4884.
- [7] VLADIMIR Y, S. Application of electronic compass for mobile robot in an indoor environment [C]. *Roma: Proceedings of the 2007 IEEE International*

Conference on Robotics and Automation, 2007: 2963-2970.

- [8] 秦勇,赵杰,王晓宇. 基于椭圆拟合误差补偿算法的数字磁罗盘[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(2): 490-493.
- QING Y, ZHAO J, WANG X Y. Digital magnetic compass based on ellipse matching error compensation Algorithm [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, 39(2): 490-493. (in Chinese)
- [9] 刘诗斌. 无人机磁航向测量的自动罗差补偿研究[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 411-414.
- LIU SH B. Study on automatic magnetic deviation compensation of magnetic heading measurement for UAV [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 39(2): 490-493. (in Chinese)
- [10] 张静,金志华,田蔚风. 无航向基准时数字式磁罗盘的自差校正[J]. 上海交通大学学报, 2008, 38(10): 1757-1760.

ZHANG J, JIN ZH H, TIAN W F. Deviation calibrating for digital magnetic compass without heading reference [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 38(10): 1757-1760. (in Chinese)

- [11] 高贯斌,王文,林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1766-1771.
- GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1766-1771. (in Chinese)
- [12] 许廷发,赵思宏,周生兵,等. DSP并行系统的并行粒子群优化目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2236-2239.
- XU T F, ZHAO S H, ZHOU SH B, *et al.*. Particle swarm optimizer tracking based on DSP parallel system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2236-2239. (in Chinese)

作者简介:



刘仁浩(1981—),男,四川江油人,博士研究生,2004年,2007年于中北大学分别获得学士、硕士学位,主要从事再入飞行器姿态测量技术的研究。E-mail: liurenhao2004@163.com



王 华(1961—),男,山西太原人,博士,教授,博士生导师,1982年于太原机械学院获得学士学位,1998年于北京理工大学获得博士学位,2000年于北京航空航天大学博士后出站,主要从事再入微小型飞行器设计、飞行控制等方面的研究。E-mail: whua402@163.com