

## 旋翼飞行机器人磁罗盘误差分析及校准

戴磊<sup>1,2</sup>, 齐俊桐<sup>1</sup>, 吴冲<sup>1,2</sup>, 韩建达<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 以旋翼飞行机器人组合导航系统为研究背景, 针对电子磁罗盘的误差校准方法进行研究. 通过分析其测量原理和误差来源, 总结出影响磁罗盘航向解算精度的 5 个主要误差因素. 对于上述误差因素, 提出了软件和硬件解决办法. 考虑到旋翼飞行机器人平台的特殊性, 提出了硬磁罗差和标度因数误差的简化校准实现方法, 简化后的磁罗盘校准方法, 免去了校准过程中将载体竖起的步骤, 且不降低校准精度. 实际的磁罗盘校准测试表明, 本文提出的方法能避免将大尺寸的载体竖起, 降低校准操作的难度. 该方法可以有效地修正原始磁场测量值的椭球分布, 从而提高组合导航系统航向解算精度.

**关键词:** 磁罗盘; 校准; 椭圆拟合; 硬磁误差

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2012)-04-0418-06

## Magnetic Compass Error Analysis and Calibration for Rotorcraft Flying Robot

DAI Lei<sup>1,2</sup>, QI Juntong<sup>1</sup>, WU Cong<sup>1,2</sup>, HAN Jianda<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the research background of the rotorcraft flying robot's integrated navigation system, an error calibration method for electric magnetic compass is proposed. Based on the analysis of the magnetic compass's measurement theory and error sources, 5 main factors which affect the heading angle calculation precision of the magnetic compass, are summarized. In response to the mentioned error factors, software and hardware solutions are proposed. Considering the specialties of rotorcraft flying robot, a simplified calibration method for magnetic compass is proposed to calibrate the hard magnetism errors and scale factor errors. The simplified magnetic compass calibration method can avoid sticking up the robot during calibration process, but its calibration precision is not decreased. The actual calibration test of the magnetic compass shows that the proposed calibration method can effectively correct the measurements' ellipsoidal distribution of the original magnetic field, and it also can improve the heading angle calculation precision of integrated navigation system. This method can simplify the calibration process and avoid to stick up the huge robot.

**Keywords:** magnetic compass; calibration; ellipse fitting; hard magnetism error

### 1 引言 (Introduction)

旋翼飞行机器人的航向角精度和航向角变化均匀性对于其航向控制十分重要. 电子磁罗盘、陀螺寻北仪、GPS 定向系统等均可测量载体的航向角. 其中, 陀螺寻北仪和 GPS 定向系统的航向角测量精度较高, 但陀螺寻北仪体积大、功耗高、初始对准时间长、价格昂贵, 而 GPS 定向系统动态响应速度慢、信号易受干扰、精度受天线基线长度影响明显, 二者均不适合安装在小型旋翼飞行机器人上. 电子磁罗盘虽然存在航向测量精度不高、对磁场环境敏感的缺点, 但其成本低、动态响应快、启动时间短、

体积小、功耗低, 非常适合在精度要求不苛刻的旋翼飞行机器人上使用.

受环境因素和电子磁罗盘自身因素的影响, 电子磁罗盘常存在较大的航向角误差, 因此经常需要在使用前校准. 磁罗盘校准的一般方法是使安装有磁罗盘的载体做特定的运动, 或者将载体转动到某些特定的角度, 得到磁罗盘在不同姿态下的磁场强度测量值. 通过对测量值分析, 进行磁罗盘的校准. 文 [1] 利用飞机左右盘旋飞行时的采样数据, 实现对载体上铁磁材料引起的罗差的自动补偿. 文章采用椭圆假设算法, 利用飞机在多于 5 个的不同方向

平飞时的采样数据来自动补偿平飞时的罗差. 在任意姿态飞行时, 计算出相对于椭圆假设的 24 个系数, 并利用飞机的俯仰角、滚转角以及地磁场垂直分量计算出任意姿态下的罗差补偿系数. 文 [2] 将载体转动 1 周的磁通密度测量数据取平均作为硬铁磁场强度, 在载体航向角为  $0^\circ$  的特殊情况下, 建立软铁系数的随机游走模型, 对软铁系数进行估计. 文 [3] 使用无磁转台在水平面内旋转 1 周或转动到多个已知位置, 测量并计算磁场强度的最大、最小值, 求取均值和比例系数, 从而获得磁罗盘的零偏值和标度因数, 实现误差的标定及补偿. 文 [4] 利用任意多个不同位置下的大量测量数据, 通过迭代的方法求取磁罗盘校准参数的最优解, 利用约束条件避免校准过程中磁场干扰的影响, 且校准值为绝对矢量.

本文首先分析电子磁罗盘的工作原理和误差产生来源, 归纳出影响磁罗盘航向角计算精度的 5 个主要因素. 从机理上解释了罗差和标度因数误差导致磁罗盘的测量磁场非球形分布的原因, 并通过实验数据进行证明. 在理论分析的基础上, 采用软硬件结合方法降低航向角计算误差, 并提出了一套避免竖立载体进行磁罗盘校准的校准补偿方法. 该方法利用在载体上水平放置磁罗盘时多个航向角下的磁场强度数据, 以及在载体外竖直放置磁罗盘时测量的磁场强度数据, 求取出各个补偿系数. 在保持磁罗盘航向角解算精度的条件下, 降低磁罗盘校准操作的复杂度.

## 2 电子磁罗盘测量原理 (Measurement principle of the electronic magnetic compass)

电子磁罗盘的工作原理是, 利用磁阻传感器测量地磁场强度, 根据其水平分量的比值来确定载体相对地磁北向的航向角. 电子磁罗盘能投入实际应用, 得益于英国物理学家 William Thompson 在 1857 年发现在铁磁金属中的磁阻效应, 以及 1958 年集成电路技术和厚膜电路技术的进步. 根据用途不同, 磁阻元件分为巨磁阻传感器、异向性磁阻传感器 (anisotropic magnetoresistive, AMR) 等多种形式, 其中 AMR 是电子磁罗盘常用的磁阻元件. 近几年 PNI Sensor Corporation、NXP Semiconductors、Honeywell 等公司先后推出了 AMR 和相应的处理芯片, 简化了电子磁罗盘的开发 [5-7]. 本文以 PNI 公司的磁阻元件为基础, 设计电子磁罗盘, 进行磁航向角测量与校准研究.

组合导航系统的航向角度解算是以电子磁罗盘

给出的航向角度为基准, 结合由陀螺仪和加速度计数据得出的姿态角度, 根据运动学模型推算出当前的真北航向角. 当电子磁罗盘水平放置时, 俯仰角和滚转角度均为  $0$ , 磁航向角  $\psi$  可通过磁阻传感器的水平分量比值的反正切值来确定, 即:

$$\psi = \arctan \frac{H_{ny}}{H_{nx}} \quad (1)$$

其中,  $H_{nx}, H_{ny}$  分别为导航坐标系下  $X$ 、 $Y$  轴磁场强度. 导航坐标系是一种当地地理坐标系. 原点位于机体的重心,  $X$  轴指向地理北向,  $Y$  轴指向地理东向,  $Z$  轴指向当地垂线方向, 且  $X$ - $Y$  轴平面与地球表面相切. 机体坐标系以旋翼飞行机器人的重心为原点, 各个轴沿机体的滚转、俯仰、偏航方向.

一般情况下, 安装在机体上的电子磁罗盘的坐标系和机体坐标系  $OXYZ$  相同. 它与导航坐标系存在俯仰角  $\theta$ , 滚转角  $\phi$  (如图 1 所示). 航向角度解算前需要根据载体的俯仰角和滚转角, 将磁罗盘在机体坐标系下的磁场强度测量值投影到导航坐标系下 [8-9].

本体坐标系到导航坐标系的姿态转移矩阵为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \sin \theta \\ 0 & \cos \phi + \sin \phi \sin \theta & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) 中俯仰角  $\theta$ , 滚转角  $\phi$  为已知值, 由组合导航系统给出. 设本体坐标系下三轴磁场强度测量值为  $\mathbf{H} = [H_x \ H_y \ H_z]^T$ , 则导航坐标系下磁场强度为  $\mathbf{H}_n = C_b^n \mathbf{H}$ . 由式 (1)、(2) 可得, 任意姿态角下的磁航向角度为

$$\varphi = \arctan \frac{H_x \sin \phi - H_y \cos \phi}{H_x \cos \theta + H_y \sin \theta \cos \phi + H_z \sin \theta \cos \phi} \quad (3)$$

式 (3) 计算出的是相对地磁北极的磁航向角, 与导航坐标系下的相对于地理北极的真北航向角不同 [10], 两者间存在一个地磁偏角.

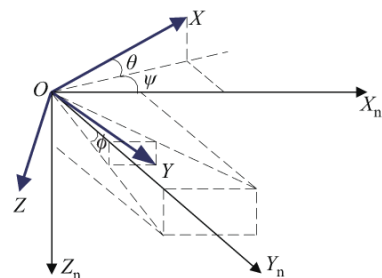


图 1 机体坐标系与导航坐标系关系

Fig.1 Relationship between aircraft coordinates and navigation coordinates

### 3 磁罗盘误差来源分析 (Error sources analysis on magnetic compass)

由于磁阻传感器的物理特性差异、焊接安装过程差异、非正交安装误差、电子磁罗盘的安装角误差以及工作温度、硬磁环境和软磁环境等因素的影响,电子磁罗盘在确定真北航向角度过程中,存在着地磁偏角、软/硬磁场罗差、标度因数误差、三轴磁场分量耦合误差以及量化误差等误差.下面对这些误差的产生原因进行分析.

#### 3.1 地磁偏角

地磁场是弱磁场,地磁场的磁场强度  $H_0$  约为  $0.4 \text{Gs} \sim 0.65 \text{Gs}$ .地磁场垂直分量比较大,而用于计算航向的水平分量比较小.地球上任意一点的磁场方向是由相对于真北方向的夹角(磁偏角)和相对于水平方向的夹角(磁倾角)来确定的.如图2所示,地磁场水平分量的指向接近于地理的真北方向,但是地理真北方向和地磁北方向存在夹角,即磁偏角  $\gamma$ .且磁偏角随着地理位置、时间的不同也不尽相同,即  $\gamma$  不是一个常数.磁偏角和磁倾角可根据当地地理坐标,查阅地磁图或利用相关数学模型<sup>[11-12]</sup>获得.当电子磁罗盘计算出磁北航向角  $\psi_c$  后,通过补偿磁偏角  $\gamma$ ,最终可得飞机真北航向角:

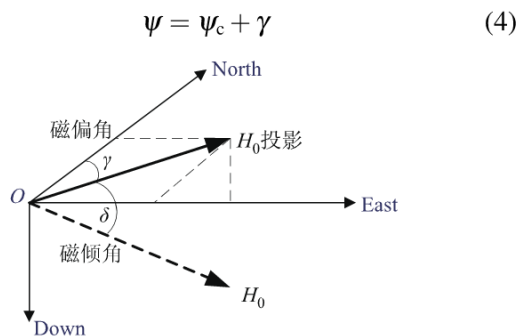


图2 地磁场分量图

Fig.2 Geomagnetic component diagram

#### 3.2 罗差

理想情况下,电子磁罗盘仅受地磁场作用,但实际上它还受载体磁场的影响.这种由地磁场外的磁场导致的航向偏差,称为罗差或自差.具体地讲,测量磁场由地磁场、软铁磁场和硬铁磁场组成,且三者很难区分<sup>[13]</sup>.

软铁磁场是载体上随环境、时间变化的磁场.它被环境磁场磁化后获得磁性或者因导线通电导致磁场强度和方向发生变化,其磁性随着环境磁场的大小和方向而改变.软铁磁场对磁罗盘产生作用力的方向,跟它与磁罗盘的相对位置有关.软铁磁场对磁罗盘产生作用力的大小与软铁材料、软铁的姿

态、激励磁场、软铁与磁罗盘的距离等因素有关.软铁磁场的罗差会随着纬度发生变化.由于罗差随环境变化,因而进行有效的计算补偿比较困难.但是通过合理地设置电子磁罗盘在载体上的位置,可以减少软铁磁场产生的罗差,有效地减小其对航向角计算的影响<sup>[14]</sup>.

硬铁磁场是载体上大小和方向固定的磁场,它不随姿态与纬度而变化.载体上硬铁磁场主要由永久磁铁、大功率恒定电流通电导线、电机等形成.对于旋翼飞行机器人上电子设备布置紧密,其上硬铁磁场影响较大.硬铁磁场产生的罗差是固定的,它表现为附加在三轴磁场强度测量值上的静态偏移量  $H_h = [H_{xh} \ H_{yh} \ H_{zh}]^T$ .这个偏移量可以通过硬磁校准获得.

#### 3.3 标度因数误差

磁航向角是通过磁罗盘的三轴磁场强度测量值的比值求出的,因此只需测量磁场强度的相对值.上述的计算过程是建立在磁阻传感器的A/D转换电路无量化误差的假设基础上.由于磁阻传感器在安装中的不一致性,以及焊接过程造成的热损伤,不同磁阻传感器在相同磁场强度下输出的A/D转换值不同,即存在一组测量值归一化比例因数  $a_x : a_y : a_z$ ,因此需对三轴磁阻传感器的输出值进行归一化处理.常用的归一化方法有三点校准法、八点校准法和旋转校准法.这些方法的核心思想是通过变换磁罗盘的姿态和航向,获得正交的3个磁阻传感器在相同磁场下的输出值,从而进行磁阻传感器输出值的归一化<sup>[15]</sup>.

#### 3.4 三轴磁场分量耦合误差

设计电子磁罗盘时,要求3个磁阻传感器正交排布.实际安装中,实现正交排布是很困难的.因此在本体坐标系下, $Y$ 、 $Z$ 轴磁场强度在 $X$ 轴上会产生很小的分量, $X$ 、 $Z$ 轴磁场强度会在 $Y$ 轴上产生很小的分量.设  $H_x, H_y, H_z$  为磁罗盘校准后的测量值,  $H_{xm}, H_{ym}, H_{zm}$  为原始测量值,  $b_n$  为非正交补偿系数.三轴磁场分量的耦合关系可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{xm} + b_1 H_{ym} + b_2 H_{zm} \\ H_{ym} + b_3 H_{xm} + b_4 H_{zm} \\ H_{zm} + b_5 H_{xm} + b_6 H_{ym} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & b_1 & b_2 \\ b_3 & 1 & b_4 \\ b_5 & b_6 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

从上式可以看出,正交分布的3个磁场传感器

的6个安装角误差形成矩阵  $\mathbf{B}$ , 矩阵  $\mathbf{B}$  为姿态转移矩阵的乘积.

### 3.5 量化误差

磁阻传感器在测量过程中, 由于基准电压波动、环境温度变化、磁阻传感器自身的非线性、振动、冲击等因素的影响, 测量值存在非线性分布和恒定的零偏. 不过, 磁阻传感器生产商提供的专用 A/D 采集电路, 可以补偿上述因素带来的零偏和非线性误差.

## 4 磁罗盘校准 (Calibration of the magnetic compass)

### 4.1 磁罗盘校准原理

电子磁罗盘应用设计中, 需要考虑第3节所述的5种影响磁罗盘航向测量精度的因素. 首先, 在数据采集过程中, 通过配置处理器初始化参数, 量化误差可由专用的 A/D 采集电路补偿; 其次, 三轴磁场分量耦合误差不可避免, 通过在组装过程中精密地正交安装磁阻传感器, 可使磁场耦合矩阵  $\mathbf{B}$  的非对角元素小于 0.01, 近似等于单位阵, 可忽略三轴磁场分量耦合误差. 第三, 针对旋翼飞行机器人结构特点, 将罗盘布置在复合材料制成的机尾上, 使罗盘既远离发动机等干扰源, 又远离机身的铁磁材料. 尽可能减小软铁罗差. 第四, 参考 world magnetic model (WMM) 给出的地磁偏角, 在校磁时将地磁偏角数据写入组合导航系统的处理器, 对磁偏角进行精确补偿, 提高真北航向角的精度.

针对硬磁罗差和标度因素误差, 由于旋翼飞行机器人巡航半径小于 20 km, 在比较小的巡航范围内, 地磁场的磁场强度  $H_0$  通常不会发生明显变化, 因此假设磁场强度的平方和为定值, 那么对于硬磁罗差和标度因数误差, 下面的方程近似成立:

$$\frac{(H_x - H_{xh})^2}{a_x^2} + \frac{(H_y - H_{yh})^2}{a_y^2} + \frac{(H_z - H_{zh})^2}{a_z^2} = H_0^2 \quad (6)$$

其中,  $a_x, a_y, a_z$  为磁阻传感器的标度因数,  $H_x, H_y, H_z$  为磁场强度的测量值,  $H_{xh}, H_{yh}, H_{zh}$  为硬磁罗差. 式(6)描述了一个中心不在原点的椭球, 硬磁罗差代表椭球中心的位置, 标度因数误差代表椭球的半径.

硬磁罗差变化是载体本身的特性引起的, 载体上的某些铁磁金属或磁性设备会在不同的地域发生不同强度的磁化, 形成不同强度的载体磁场. 这造成椭球的中心在不同的地理位置会发生变化, 所以电子磁罗盘到达新的使用地点后, 需要进行校准. 硬磁校准后, 可以将复杂的磁场环境简单化, 即磁

场的测量值可由磁罗盘校准前的地磁场测量值与硬磁场测量值的和, 简化为地磁场测量值.

归一化传感器的标度因数, 使每个磁阻传感器在相同的磁场强度下的输出值一致, 从而将椭球形的测量磁场转换成球形分布的磁场. 因此, 式(3)求出的航向角会跟随磁场强度均匀变化, 不至于发生航向角突变, 影响航向角计算精度.

通过对磁罗盘校准, 可以将式(6)的测量值形成的中心不在原点的椭球形磁场转变为修正后的中心在原点的球形磁场, 消除标度因数和硬磁罗差的影响. 另外从式(3)和式(6)可以看出, 测量出的磁场强度大小不需要量纲, 获得三轴磁场强度的相对值即可计算出磁航向角.

### 4.2 磁罗盘校准方法

文献中, 常用的旋转校正法是将磁罗盘固定在载体上, 连同载体使磁罗盘的  $X$ 、 $Y$  轴在水平面内旋转, 然后将载体竖起, 使磁罗盘的  $Z$  轴在水平面内旋转. 通过在相同的水平磁场中旋转, 统计出每个轴的最大测量值  $H_{\max}$  和最小测量值  $H_{\min}$ , 根据统计出的最大值及最小值计算硬磁罗差  $H_n$  ( $n = x, y, z$ ) 和标度因数  $a_n$  ( $n = x, y, z$ ), 从而实现磁罗盘测量值的补偿. 上述磁罗盘校准操作的计算公式如下:

$$\begin{aligned} H_n &= (H_{\max} + H_{\min})/2 \\ a_n &= (H_{\max} - H_{\min})/2 \end{aligned} \quad (n = x, y, z) \quad (7)$$

对于一般的地面和水面使用环境, 载体的姿态变化较小, 且很慢, 磁罗盘的  $Z$  轴磁场分量对航向角计算影响不大. 甚至某些情况下, 可以不对  $Z$  轴磁场进行校准. 但是旋翼飞行机器人姿态变化大、速度快、航向变化快, 而且对航向角精度要求高. 特别是当旋翼飞行机器人做大机动的运动时,  $Z$  轴磁场分量对航向角计算影响十分明显. 因此必须对磁罗盘的三轴进行精密校准. 然而对于机身长度超过 2 m 的旋翼飞行机器人, 在实际磁罗盘校准操作中, 可以连同载体使磁罗盘  $X$ 、 $Y$  轴在水平面内旋转. 但由于载体的体积巨大, 难以将载体竖起对  $Z$  轴进行磁罗盘校准.

通过 3.3 节的分析, 将载体竖起使  $Z$  轴在水平方向旋转的主要目的是进行磁阻传感器标度因数归一化, 而不是完成硬磁罗差的校正. 因此可对磁罗盘校准过程进行如下改进:

(1) 将电子磁罗盘取下, 在载体附近对磁罗盘进行三轴旋转校正, 计算出磁阻传感器的标度因数;

(2) 当磁罗盘的  $X$ 、 $Y$  轴水平时, 记录  $Z$  轴磁场强度  $H_{z1}$ ;

(3) 将罗盘安装在远离磁性元件的载体上, 连同载体对磁罗盘 X、Y 轴在水平方向旋转校磁, 计算出 X、Y 轴的硬磁罗差;

(4) 将载体放平记录 Z 轴磁场强度  $H_{z2}$ , 则 Z 轴硬磁罗差近似为  $H_{zh} = H_{z2} - H_{z1}$ .

通过上述 4 个步骤完成磁罗盘的校准, 避免将载体竖起, 简化磁罗盘校准操作.

### 5 实验 (Experiment)

根据美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的 WMM 地磁模型, 可计算出实验场地 2011 年 5 月份地表附近的地磁偏角为  $-8^{\circ}39'$ , 地磁倾角  $59^{\circ}31'$ . 此参数用于补偿真北航向角误差.

使用针对旋翼飞行器机器人自主开发的组合导航系统 (图 3) 进行实际校准实验. 对系统中的电子磁罗盘按照 4.2 节中提出的方法进行校准. 当磁罗盘在载体附近水平放置时, 测得 Z 轴磁场强度为 747. 当磁罗盘在载体上水平放置时, 测得 Z 轴磁场强度为 788, 则电子磁罗盘的 Z 轴硬磁罗差为  $-41$ . 然后对电子磁罗盘进行旋转校准, 与改进后的磁罗盘校准方法进行对比, 通过计算得到数据表 1.

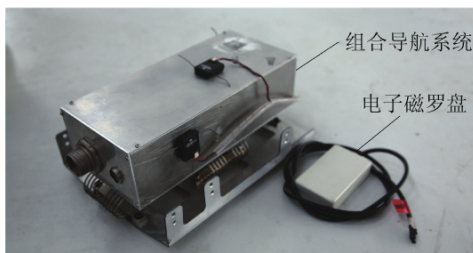


图 3 旋翼飞行器机器人组合导航系统

Fig.3 Integrated navigation system for rotor-wing robot

表 1 磁罗盘校准数据表

Tab.1 Magnetic compass calibration data

	X 轴磁场强度	Y 轴磁场强度	Z 轴磁场强度
最大值	490	522	461
最小值	-453	-486	-548
硬磁罗差	18.5	18	-43.5
标度因数	471.5	504	504.5

由上表旋转校准测量出的 Z 轴硬磁罗差和水平校准测量的 Z 轴硬磁罗差比较可看出, 两者磁场强度误差 2.5, 只占 Z 轴磁场强度测量值的 0.31%. 可认为简化的磁罗盘校准方法得出的 Z 轴硬磁罗差是可信的.

根据简化方法计算出的磁罗盘校准参数, 对组合导航系统的磁罗盘进行测试, 得出一组磁罗盘校准前后的磁场强度的对比曲线.

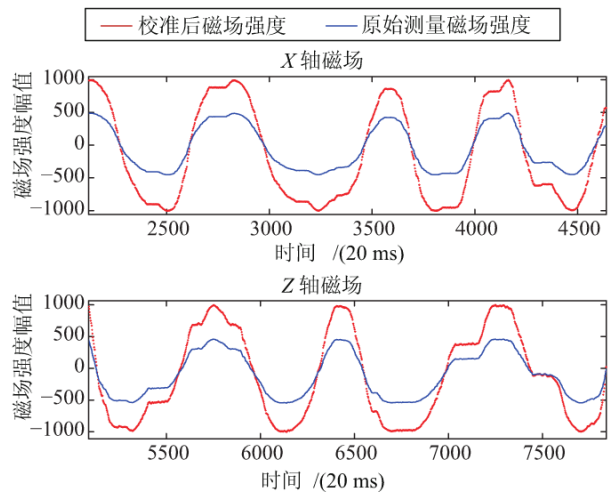


图 4 校磁前后 X 和 Z 轴磁场强度对比

Fig.4 Magnetic field intensity in X and Z axis before and after magnetic calibration

图 4 对比了标度因素和硬磁罗差校准前后 X 和 Z 轴的磁场强度. 其中, 实线为磁罗盘校准前的磁场强度曲线, 点线为磁罗盘校准后的磁场强度曲线. 通过对曲线数据分析, 由于硬磁罗差的影响, 磁罗盘校准后, X 轴磁场强度测量值曲线下移 18.5 个单位, Z 轴磁场强度测量值曲线上移 43.5 个单位. 由于磁阻传感器测量范围不同, 在相同的地磁环境中, 归一化前 X 轴磁场强度测量值变化范围为 943, Z 轴磁场强度测量值变化范围为 1009, 归一化后使测量值变化范围相同.

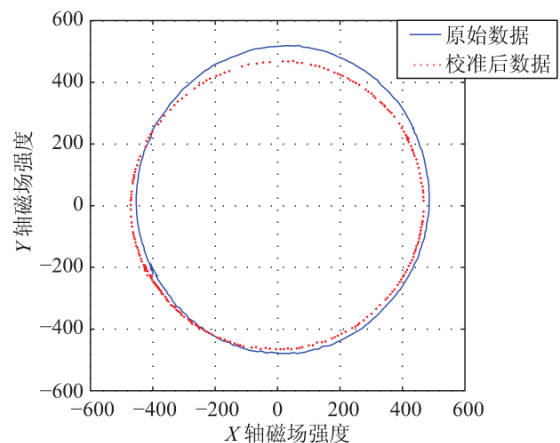


图 5 磁罗盘校准前后水平方向磁场分布情况

Fig.5 Distribution of horizontal magnetic field before and after magnetic calibration

图 5 给出磁罗盘校准前后水平方向磁场分布曲线. 它从另一角度描述了磁罗盘校准能使磁场强度测量值变化范围相同. 实线为磁罗盘校准前水平方向磁场分布曲线, 点线为磁罗盘校准后水平方向磁场分布曲线. 为了说明磁罗盘校准后, 磁场分布更接近正圆, 将校准后数据形成的圆按比例进行缩小,

可以看出,磁罗盘校准后曲线更接近于正圆。通过计算,实线构成的椭圆离心率为0.0626,红色点线构成的椭圆离心率为0.00958。磁罗盘校准后水平方向磁场分布的中心回归到原点。

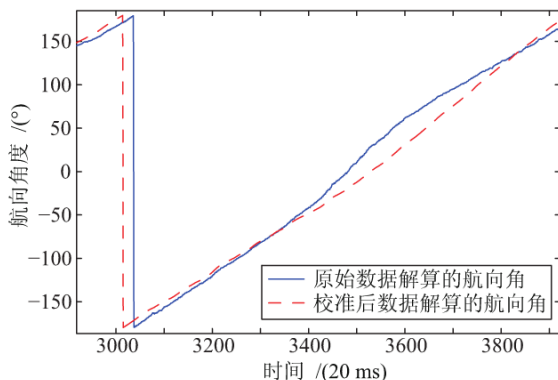


图6 磁罗盘校准前后航向角度对比

Fig.6 Yaw angle before and after magnetic calibration

实际飞行中,使飞机的航向连续匀速转动得到图6。其中实线为原始数据解算得到的磁航向角,虚线为对原始数据进行磁罗盘校准和磁偏角补偿后解算的航向角。图6中,3000至3950点的实线有明显的弯曲,说明利用未进行磁罗盘校准的数据解算出的航向角度,受到硬铁磁场影响变化不均匀。而虚线比较直,说明磁罗盘校准后航向角度变化均匀。这表明通过校磁能够有效地改善测量值的分布规律,使得航向角计算值变化更均匀。另外由于进行 $-8^{\circ}39'$ 的真北航向角度补偿,虚线与实线相比向左发生了平移。可以看出磁罗盘校准及补偿真北航向角度后,航向角计算值变化更均匀。简化后的磁罗盘校准方法既保持了航向角计算的精度,又降低了磁罗盘校准操作的复杂度。

## 6 结论 (Conclusions)

本文针对旋翼飞行器导航系统中电子磁罗盘的误差来源、误差校准方法进行了研究。根据电子磁罗盘的测量原理结合旋翼飞行机器人的特点,系统地分析了影响磁罗盘航向计算精度的地磁偏角、软磁/硬磁罗差、标度因数误差、三轴磁场分量耦合误差、量化误差等5种主要因素。从机理上解释了罗差和标度因数误差导致测量磁场非球形分布的原因,并通过实验数据进行证明。针对上述误差来源,提出了工程实践中软/硬件解决办法及安装中的注意事项。特别的,对于硬磁罗差和标度因数误差的校准,在对磁罗盘校准机理进行详细分析的基础上,针对旋翼飞行器尺寸大、在姿态变化时对航向角精度要求高的特点,提出了全新的简化的磁罗盘校准方式。通过新的磁罗盘校准的操作过

程,免去校准过程中将旋翼飞行器竖起的步骤,提高了磁罗盘校准过程的可操作性。通过实际的磁罗盘校准测试,证明这种方法在简化操作的基础上,能有效地修正原始磁场测量值的椭球分布,且不降低航向解算的精度。

## 参考文献 (References)

- [1] 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 S B. Study on automatic magnetic deviation compensation of magnetic heading measurement for UAV[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(2): 411-414.
- [2] Smith R, Forst A, Probert P. A sensor system for the navigation of an underwater vehicle[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(7): 697-710.
- [3] 袁智荣. 三轴磁航向传感器的全姿态误差补偿[J]. 传感器技术, 2003, 22(9): 34-36.  
Yuan Z R. All status error compensation about three axis magnetic heading sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(9): 34-36.
- [4] 孙宏伟, 房建成. 一种AMR磁罗盘的误差建模与校准方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 104-107.  
Sun H W, Fang J C. Error modeling and calibration method of AMR compass[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 104-107.
- [5] PNI Corporation. Multipoint calibration primer[OL]. [2009-07-01]. <http://wenku.baidu.com/view/3ec585323968011ca30091f0.html>.
- [6] NXP Semiconductors. Electronic compass design using KMZ51 and KMZ52[OL]. [2005-01-01]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.17.3203>.
- [7] Honeywell/Commercial Switch & Sensor. AMR磁阻传感在车辆检测和罗盘定向的应用[OL]. [2002-11-01]. [http://www.honeywell-sensor.com.cn/prodinfo/sensor\\_magnetic/applications\\_notes/apn02.pdf](http://www.honeywell-sensor.com.cn/prodinfo/sensor_magnetic/applications_notes/apn02.pdf).
- [8] 蔡体菁, 刘莹, 宋军, 等. 嵌入式GPS/MIMU磁罗盘组合导航系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2695-2699.  
Cai T J, Liu Y, Song J, et al. Embedded integrated GPS/MIMU/compass navigation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(12): 2695-2699.
- [9] 邱丹, 黄圣国. 组合航向系统中数字磁罗盘的罗差补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(z2): 1370-1401.  
Qiu D, Huang S G. Study on magnetic deviation compensation for digital magnetic compass in combined heading system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(z2): 1370-1401.
- [10] 周伟静, 沈怀荣. 一种利用磁偏角地磁图自动计算磁偏角的方法[J]. 测绘工程, 2007, 16(1): 51-54.  
Zhou W J, Shen H R. A method of automatically computing magnetic declination via the geomagnetic declination map[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16(1): 51-54.
- [11] McLean S, Maus S. The US/UK world magnetic model for 2011 - 2015[R/OL]. [2011-01-01]. [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMMReports/TRWMM\\_2005.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMMReports/TRWMM_2005.pdf).

## 5 结论 (Conclusion)

环境模型决定了移动机器人存储和利用环境知识进行路径规划的方式. 本文提出了一种综合拓扑地图和几何地图优点的混合地图模型——灰色定性地图, 其主要特点在于用环境的凸剖分作为拓扑地图的节点. 这一特点使得在灰色定性地图定性层中的推理一定程度上可以模拟人类智能的思维模式, 并且凸剖分相对于三角剖分来说具有更高的整体性, 有利于机器人获得更优的路径.

实验表明: 由于提出的环境模型相比于三角剖分地图具有更高的整体性, 因此它能在降低环境模型复杂度的同时缩短路径长度, 并减少机器人重启的次数.

### 参考文献 (References)

- [1] 蔡自兴, 邹小兵. 移动机器人环境认知理论与技术的研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 87-91.  
Cai Z X, Zou X B. Research on environmental cognition theory and methodology for mobile robots[J]. Robot, 2004, 28(1): 87-91.
- [2] Elfes A. Occupancy grids: A probabilistic framework for robot perception and navigation[D]. Pittsburgh, PA, USA: Carnegie Mellon University, 1989.
- [3] Borges G A, Aldon M J. Robustified estimation algorithms for mobile robot localization based on geometrical environment maps[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 45(3/4): 131-159.
- [4] Lisien B, Morales D, Silver D, et al. The hierarchical atlas[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(3): 473-481.
- [5] Kuipers B. An intellectual history of the spatial semantic hierarchy[M]//Springer Transactions in Advanced Robotics, vol.38. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008: 243-264.
- [6] Kuipers B. The spatial semantic hierarchy[J]. Artificial Intelligence, 2000, 119(1/2): 191-233.
- [7] Thrun S. Robotic mapping: A survey[J]. Computer and Information Science, 2002, 298(February): 1-35.
- [8] 李天成, 孙树栋, 高扬. 基于扇形栅格地图的移动机器人全局路径规划[J]. 机器人, 2010, 32(4): 547-552.  
Li T C, Sun S D, Gao Y. Fan-shaped grid based global path planning for mobile robot[J]. Robot, 2010, 32(4): 547-552.
- [9] 刘作军, 黄亚楼, 王郅维. 基于电路地图的移动机器人路径规划[J]. 机器人, 2004, 26(6): 563-568.  
Liu Z J, Huang Y L, Wang D W. Path planning of mobile robot based on circuit map[J]. Robot, 2004, 26(6): 563-568.
- [10] Belta C, Isler V, Pappas G J. Discrete abstractions for robot motion planning and control in polygonal environments[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(5): 864-874.
- [11] 李书杰, 陈宗海. 智能模拟中知识表达方法的综述与分析[C]//系统仿真技术及其在应用. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 1-6.  
Li S J, Chen Z H. Survey and comments of knowledge representation in intelligent simulation research[C]//System Simulation Technology & Application. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009: 1-6.
- [12] Choi J, Choi M, Nam S Y, et al. Autonomous topological modeling of a home environment and topological localization using a sonar grid map[J]. Autonomous Robots, 2011, 30(4): 351-368.
- [13] Deng J L. Control problems of grey system[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.
- [14] Zhou P D. An algorithm for partitioning polygons into convex parts[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997, 6(4): 363-368.
- [15] Yan H Y, Wang H F, Chen Y Z. Mobile robot navigation in the triangulation of dynamic environment[C]//International Conference on Information and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 776-783.

### 作者简介:

- 李书杰 (1983-), 女, 博士生. 研究领域: 灰色定性知识表达, 机器人导航.
- 王 鹏 (1988-), 男, 博士生. 研究领域: 灰色定性知识表达, 机器人导航.
- 陈宗海 (1963-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 复杂系统建模与控制, 模式识别与智能机器人.

(上接第 423 页)

- [12] Vcelak J, Ripka P, Platil A, et al. Errors of AMR compass and methods of their compensation[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2006, 129(1/2): 53-57.
- [13] Jurman D, Jankovec M, Kamnik R, et al. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2007, 138(2): 411-420.
- [14] 张静, 田蔚风, 金志华. 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, 2004, 38(10): 1754-1760.  
Zhang J, Tian W F, Jin Z H. Deviation calibrating for digital magnetic compass without heading reference[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(10): 1754-1760.
- [15] 沈鹏, 徐景硕, 高扬. 电子磁罗盘测量误差校正方法研究

[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1902-1905.

Shen P, Xu J S, Gao Y. Study on new error compensation methods of EMC[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(10): 1902-1905.

### 作者简介:

- 戴 磊 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 多传感器数据融合, 组合导航.
- 齐俊桐 (1981-), 男, 博士, 助理研究员. 研究领域: 旋翼飞行机器人.
- 吴 冲 (1987-), 男, 博士生. 研究领域: 飞行器动平台起降, 多传感器数据融合.