

# 基于差分磁罗盘的动态干扰识别技术

郝振海, 杨新勇, 黄圣国

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为解决城市交通中低频动态磁场对磁罗盘的干扰问题, 设计了基于差分磁罗盘和速率陀螺的组合航向系统. 其基本原理是, 当差分磁罗盘检测出动态低频干扰时, 系统切换至陀螺工作方式. 将磁场强度误差及其变化率、差分磁罗盘相对航向差及其变化率作为特征参数, 提出了基于阈值判断-模糊  $c$ -均值分类的两级差分磁罗盘动态罗差识别技术. 实验结果表明, 系统的航向误差小于  $6^\circ$ , 动态干扰识别率超过 70%.

**关键词:** 动态干扰; 差分磁罗盘; 模糊  $c$ -均值分类

中图分类号: V241.61 文献标识码: A

## Recognition Technology of Dynamic Magnetic Interference Based on Differential Magnetic Compasses

HAO Zhenhai, YANG Xinyong, HUANG Shengguo

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to solve the magnetic compass interference problem caused by the low-frequency dynamic magnetic interference in urban traffic, an integrated heading system based on the differential magnetic compasses (DMC) and the rate gyroscope was designed. When the low-frequency dynamic magnetic interference is recognized by DMC, the integrated heading system converts to the rate gyroscope working mode. The error of magnetic field intensity, the relative heading difference of DMC and their change rates were analyzed and taken as system characteristic parameters. A two-step dynamic magnetic deviation recognition technology of DMC based on the judgment of threshold value and fuzzy  $c$ -means classification was investigated. An experiment shows that the heading error of the system is less than  $6^\circ$  and the dynamic interference recognition rate exceeds 70%.

**Key words:** dynamic magnetic interference; differential magnetic compasses; fuzzy  $c$ -means classification

磁罗盘和角速率陀螺都是用来测量航向的传感器. 磁罗盘通过地磁场测量磁航向, 但是易受外部磁场干扰而出现航向误差<sup>[1]</sup>. 硅微角速率陀螺在工作较长时间后, 由于其误差累积以及漂移特性, 其航向误差甚至可达几十度<sup>[2]</sup>. 可以将磁罗盘和速率陀螺两种航向传感器进行组合/融合. 一方面, 磁罗盘的磁航向为陀螺确定航向初值, 而且可以抑制陀螺累积误差与漂移; 另一方面, 利用陀螺

相对航向短时间精度高的特点, 降低外界磁场干扰对磁罗盘测量的影响<sup>[3]</sup>.

磁罗盘静态误差补偿方法已比较成熟<sup>[4-5]</sup>, 但是由于城市交通中动态干扰的严重不规则性, 磁罗盘动态误差补偿问题, 尤其是低频干扰问题尚未得到解决. 文献[6]提出基于统计特性, 通过模糊-补偿滤波方法消除磁罗盘测量值中高频干扰与低频干扰的影响, 但是没有进行实验验证. 文献[7]采

收稿日期: 2007-11-12

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA12A108)

作者简介: 郝振海(1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为智能检测与状态监控, 电话: 025-84892273, E-mail: haradona@126.com

通讯作者: 黄圣国(1941-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能交通系统理论与应用, E-mail: huangsg@nuaa.edu.cn

用自适应算法,通过 GPS 不断校正磁罗盘.文献[8]采用神经网络算法,通过外部参考航向校准磁罗盘,以消除外部干扰磁场对磁罗盘的干扰.考虑到城市交通环境的实际状况,上述方法的可用性有限.可以通过经验法、固定增益 kalman 滤波等方法对航向信息进行融合<sup>[9-11]</sup>.但是由于没有解决磁罗盘动态干扰问题,磁罗盘航向数据有效性无法得到保证.融合后的航向数据,仍以陀螺为主要判断依据,这仍会带来误差累积和漂移问题.通过两个间隔一定距离、按一定方式排列的磁罗盘组成差分磁罗盘 DMC(differential magnetic compasses)系统,可以对动态低频干扰进行识别<sup>[12]</sup>.但是,通过实验发现,DMC 存在一定程度的误识别,降低了磁航向数据可用率.组合航向系统仍然存在一定的误差累积和漂移问题.

本文在 DMC 基础上,通过模糊  $c$ -均值 FCM(fuzzy  $c$ -means)分类算法<sup>[13-15]</sup>,进一步提高磁罗盘动态低频干扰的有效识别率和磁罗盘的可用性,使组合航向系统的误差累积和漂移问题降到最小,输出航向精度进一步得到提高.

## 1 组合航向实验系统

磁罗盘动态干扰分为动态高频干扰与动态低频干扰.高频干扰使磁罗盘航向值发生突变,可以通过低通滤波算法予以消除.低频干扰主要由钢铁大桥、高架桥、隧道等长度大的铁磁建筑物造成.低频干扰使磁罗盘水平面的磁场强度投影产生畸变,与铁磁建筑物距离越近,干扰程度越高.由低频干扰引起的航向误差甚至超过  $20^\circ$ .而且低频干扰作用时间长,无法通过低通滤波算法消除.低频干扰源对组成 DMC 系统的两个磁罗盘的干扰程度不完全一致,因此可以通过 DMC 系统对低频干扰进行识别.系统硬件结构如图 1 所示.其中:MCUA 用于磁罗盘切换、磁场信息与姿态信息的接收工作,MCUB 用于角速率陀螺数据采样、计算以及与上位机的数据通讯工作,MCU 之间通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)方式进行数据传输;磁罗盘选用 HMR3300 磁罗盘模块,通过滑槽相对固定在印刷电路板上,组成 DMC 系统,通过滑槽可调整磁罗盘之间的距离, HMR3000 模块为系统提供俯仰、横滚等姿态信息; CRS03 为振动式硅微角速率陀螺,输出信号经 A/D 转换后传给 MCUB.

将 DMC 固定在“三轴无磁转台”上,通过

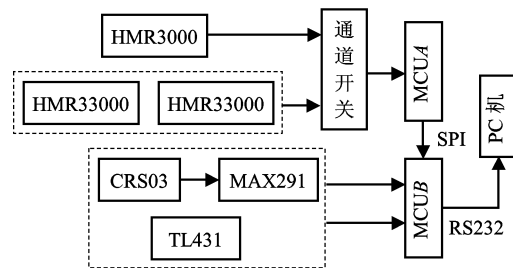


图 1 系统硬件结构框图

Fig. 1 System hardware block diagram

12 位置最小二乘法对两个磁罗盘的位置进行校正,并通过滑槽上的固定孔对磁罗盘的位置进一步细调,使两个磁罗盘精确地按直线排列.磁罗盘之间的距离为 10 cm.采用最佳椭圆拟合算法补偿磁罗盘静态误差.补偿完成后,将转台调整至零刻度,并记录此时两个磁罗盘的读数,进行初始校正.以此作为系统初始偏差,在后续数据处理时予以消除.

用磁铁、大型铁柜分别模拟磁罗盘低频干扰源,进行动态磁干扰实验.实验时,三轴无磁转台以非常缓慢的速度旋转  $360^\circ$ .在各次  $360^\circ$  旋转过程中,将干扰源分别以不同角度缓慢靠近,并通过 DMC 系统,以模拟实际交通环境下,动态低频干扰的真实状况.当 DMC 识别出动态低频干扰时,系统自动切换到陀螺工作方式;动态干扰消失,系统再自动切换回磁罗盘工作方式.数据定点采样间隔为  $10^\circ$ (无磁转台).实验前,在磁罗盘静态误差补偿后,无干扰时组合航向系统采用磁罗盘工作方式,航向误差优于  $1.2^\circ$ .实验时,当外来磁干扰很严重时,单个磁罗盘的磁航向误差甚至超过  $25^\circ$ .

## 2 DMC 特征参数的提取与分析

静态补偿后 DMC 椭圆参数为  $[C_{xk}, C_{yk}, R_{xk}, R_{yk}, \varphi_k], k=1, 2$ .其中,  $C_{xk}$  和  $C_{yk}$  分别为椭圆圆心在  $x$  轴和  $y$  轴方向上偏移的距离,  $R_{xk}$  和  $R_{yk}$  分别为椭圆的长短轴半径,  $\varphi_k$  为椭圆旋转的角度.坐标转换后,磁场强度水平投影由椭圆变成半径为  $R_k$  的正圆.某一时刻动态干扰下的磁场强度分量为  $[H_{xk}, H_{yk}]$ .与之对应的真实航向角为  $T_h$ .按静态椭圆参数对  $[H_{xk}, H_{yk}]$  进行坐标转换,得到  $[H'_{xk}, H'_{yk}]$ .上述参数的详细论述以及坐标转换方法参见文献[4].

定义磁场强度误差

$$\Delta m_k = [(H'_{xk})^2 + (H'_{yk})^2]^{1/2} - R_k,$$

$\Delta m_k$  在一定程度上反映了与静态干扰状态下的磁场强度相比,当前环境磁场的变化情况,但未对沿两个正交坐标轴分量  $[H'_{xk}, H'_{yk}]$  区别对待. 虽然  $\Delta m_k$  不能完全反映航向角误差的变化趋势,但是如果  $\Delta m_k$  值较大,可认为罗差变大的可能性较大.

时刻  $i$  磁场强度误差变化率为:

$$d\Delta m_k(i) = [\Delta m_k(i) - \Delta m_k(i-1)] / [t(i) - t(i-1)],$$
 正常情况下,  $d\Delta m_k(i)$  应为一幅值较小的随机量,若  $d\Delta m_k(i)$  较大,则产生高频干扰的可能性较大.

DMC 相对航向差  $\Delta h = h_1 - h_2 - \Delta h_r$ ,  $\Delta h_r$  为实验前误差预处理时得到的 DMC 静态固有航向差. 当 DMC 受到动态磁场干扰时,会引起  $\Delta h$  发生变化.  $\Delta h$  可作为衡量航向信号有效的重要参数.

时刻  $i$  相对航向差变化率为:

$$d\Delta h(i) = [\Delta h(i) - \Delta h(i-1)] / [t(i) - t(i-1)].$$

### 3 基于阈值判断的误差识别方法

对上述提出的各特征参数,采用阈值分析方法,对实验数据进行分析处理. 各阈值参数如下:

$V_{\Delta m}$ ——磁场强度误差  $|\Delta m_k|$  变化范围;

$V_{d\Delta m}$ ——磁场强度误差变化率  $|d\Delta m_k(i)|$  变化范围;

$V_{\Delta h}$ ——相对航向差  $|\Delta h|$  变化范围;

$V_{d\Delta h}$ ——相对航向差变化率  $|d\Delta h(i)|$  变化范围.

根据以下规则判别航向角是否有效:

若  $|\Delta m_k| < V_{\Delta m}$ ,说明航向角有效;

若  $|d\Delta m_k(i)| < V_{d\Delta m}$ ,说明航向角有效;

若  $|\Delta h| < V_{\Delta h}$ ,说明航向角有效;

若  $|d\Delta h(i)| < V_{d\Delta h}$ ,说明航向角有效.

从实验数据中抽取 3 组作为测试样本,按相同比例改变阈值参数  $V_{\Delta m}$ 、 $V_{d\Delta m}$ 、 $V_{\Delta h}$  和  $V_{d\Delta h}$  的大小,并令“较好”数据为航向误差小于  $5^\circ$  的数据,结果如表 1 所示.

通过表 1 中各数据可以看出:随着阈值参数范围不断缩小,被识别出的动态干扰数据被剔除,错误率降低,DMC 磁航向精度提高,达到  $6^\circ$  左右的水平. 但识别率呈递减趋势,这意味着磁罗盘可用性降低. 组合航向系统依然存在误差累积和漂移问题,导致组合航向系统航向误差超过  $8^\circ$ .

实验发现:随着各特征量阈值范围逐渐变小,并不能相应得到期望的理想零误差与零错误率. 这是因为,阈值范围缩小到一定程度,有可能得不到符合识别条件的有效数据,或者识别率非常低,已失去识别意义.

从表 1 中尚得不到与单一磁罗盘相比 DMC 用于动态干扰识别时的优势所在. 因此,不考虑  $V_{\Delta h}$  和  $V_{d\Delta h}$  对识别结果的影响,又做了一组对比实验,结果如表 2 所示.

可以发现,随着阈值  $V_{\Delta m}$  和  $V_{d\Delta m}$  逐渐变小,单磁罗盘航向精度得到一定程度的提高,但是和 DMC 相比,精度仍然很差. 这是因为:对单磁罗盘而言,尽管随着阈值逐渐变小,可以通过罗差对干扰进行识别,然而对于很多测量数据,其受干扰后磁场强度水平投影仍然分布在椭圆附近. 虽然根据判别条件,认为航向角有效,但是实际航向误差依

表 1 差分磁罗盘不同阈值参数对应识别结果  
Tab. 1 DMC recognition results for different threshold values

样本	识别结果	阈 值			
		$V_{\Delta m} = 200, V_{d\Delta m} = 100$ $V_{\Delta h} = 8, V_{d\Delta h} = 8$	$V_{\Delta m} = 100, V_{d\Delta m} = 50$ $V_{\Delta h} = 6, V_{d\Delta h} = 6$	$V_{\Delta m} = 60, V_{d\Delta m} = 30$ $V_{\Delta h} = 4, V_{d\Delta h} = 4$	$V_{\Delta m} = 40, V_{d\Delta m} = 20$ $V_{\Delta h} = 3, V_{d\Delta h} = 3$
1	WP/ $^\circ$ )	13.2	9.9	6.8	5.9
	RP/%	81.3	76.5	63.4	44.9
	MP/%	20.5	12.8	9.9	5.1
2	WP/ $^\circ$ )	12.9	10.2	6.6	5.7
	RP/%	82.6	72.9	59.4	42.8
	MP/%	18.6	11.3	8.4	5.9
3	WP/ $^\circ$ )	15.5	10.4	7.1	6.1
	RP/%	82.9	75.2	61.3	47.2
	MP/%	20.1	14.9	7.2	5.0

注:WP——识别后的 DMC 系统的磁航向精度;RP——识别率,识别后的较好数据与全部较好数据的比值;  
MP——错误率,识别后的非较好数据与识别数据的比值.

表2 单一磁罗盘不同阈值对应识别效果  
Tab.2 Recognition results of one compass for different value

样本	识别结果	阈 值			
		$V_{\Delta m} = 200,$ $V_{d\Delta m} = 100$	$V_{\Delta m} = 100,$ $V_{d\Delta m} = 50$	$V_{\Delta m} = 60,$ $V_{d\Delta m} = 30$	$V_{\Delta m} = 40,$ $V_{d\Delta m} = 20$
1	WP/(°)	40.1	33.6	19.7	15.5
	RP/%	88.4	78.7	70.2	60.9
	MP/%	35.2	24.2	18.9	15.6
2	WP/(°)	49.6	30.8	20.9	15.3
	RP/%	89.7	77.3	64.9	55.4
	MP/%	25.6	20.1	15.9	13.5
3	WP/(°)	46.5	34.1	18.8	15.6
	RP/%	86.2	78.1	69.2	58.6
	MP/%	30.6	23.9	14.3	14.9

然较大,精度提高有限.而DMC却可以根据两个磁罗盘受干扰程度不一致而导致相对航向差变大这一特性,进一步识别干扰,剔除受干扰的数据,从而提高了系统实际航向精度.同理,和DMC相比,由于对外部干扰识别能力有限,单磁罗盘在进行罗差识别后,航向数据中夹杂着大量错误数据,导致错误率依然很高.但是随着阈值的降低,较好数据相对却更多地得以保留,识别率反而得到一定程度的提高.

#### 4 基于FCM的动态罗差识别技术

通过阈值判断的航向误差识别方法,可以在较低错误率基础上,识别出具有一定精度水平的有效数据.虽然DMC磁航向精度可达 $6^\circ$ ,但是其识别率相对较低,使磁罗盘可用性降低,组合航向系统仍然存在一定的误差累计与漂移问题,航向误差变大,超过 $8^\circ$ .称阈值判断的误差识别为初级识别,本文中的基于FCM的动态罗差识别技术,将从初级识别得到的包含无效数据的样本中进一步剔除无效数据.

##### 4.1 FCM

对于一种模糊 $c$ -分区,定义一个目标函数

$$J_m(\tilde{U}, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^m d_{ik}^2, \quad (1)$$

式中: $\tilde{U}$ 为模糊 $c$ -分区;

$\mu_{ik}$ 为第 $k$ 个数据在第 $i$ 类中的隶属值;

$d_{ik}$ 为关于第 $i$ 类中心与第 $k$ 个数据集之间的欧几里德距离,

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[ \sum_{j=1}^m (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2},$$

$v_i$ 是第 $i$ 类的中心,它由 $m$ 个特征来描述.

对于模糊 $c$ -分区中的每一类的各个中心坐标可采用与清晰情况类似的方法进行计算:

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{m'} x_{kj}}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{m'}},$$

其中: $j$ 为特征空间中的一个变量,即:

$$j = 1, 2, \dots, m;$$

$m'$ 为加权参数,其取值范围是 $m' \in [1, \infty]$ ,该参数控制着分类过程中模糊度的大小.

同清晰情况一样,最优模糊 $c$ -分区是用式(2)所表示的最小分区,即:

$$J_m^*(\tilde{U}^*, v) = \min_{M_{fc}} J(\tilde{U}, v), \quad (2)$$

式中: $M_{fc}$ 为模糊 $c$ -分类空间.

式(2)的解不能保证是全局最优.在此,所寻求的是能满足预先规定的精度级的最优解.可采用迭代优化的模糊分类算法<sup>[15]</sup>处理.

##### 4.2 基于FCM的动态干扰识别

采用模糊 $c$ -均值算法,对一组样本数据进行分类,寻找识别目标的统计特性,并以其它组样本作为测试数据,检验该算法在动态干扰识别中的可行性.

实验中,有意选取较大的阈值进行初级识别( $V_{\Delta m} = 200, V_{d\Delta m} = 100, V_{\Delta h} = V_{d\Delta h} = 8$ ),这样可保证较高的识别率.但错误率也会较高.分类样本特征量的选择见下式:

$$\begin{cases} E_m = |\Delta m_k| / V_{\Delta m}, & 0 \leq E_m \leq 1; \\ E_h = |\Delta h| / V_{\Delta h}, & 0 \leq E_h \leq 1. \end{cases}$$

分类数目 $c$ 可按照误差大小分为大、中、小3类,故 $c \geq 3$ .为增强识别效果,取 $c = 5$ ,加权参数

$m' = 2$ .

当  $|\Delta m_k|$  和  $|\Delta h|$  较小时,  $\tilde{U}$  中各特征参数对应的隶属函数值可理解为磁罗盘误差较小的程度. 因此, 航向值有效的可信度  $K_c$  在模糊  $c$ -均值分类算法中可定义为:  $K_c(i) = \tilde{U}(4, i) + \tilde{U}(5, i)$ .

计算磁罗盘 1 和 2 各自可信度  $K_{c1}$ 、 $K_{c2}$ , 由最大-最小原理, 系统航向可信度为:

$$K_c = \min(K_{c1}, K_{c2}).$$

由以上结论, 对一组样本进行分类, 取  $\max_{i,k} |\mu_{ik}^{(r+1)} - \mu_{ik}^{(r)}| < 0.01$  ( $r$  表示第  $r$  次迭代过程), 确定分区矩阵是否收敛. 收敛后求取各样本数据对应的  $K_c$  值.

分析对于同一组数据, 由分类矩阵  $\tilde{U}$  得到的  $K_c$  值能否描述航向的误差等级. 仍然选取表 1 中的分类样本, 假设  $K_c > 0.8$  对应的数据为有效数据, 则识别结果如表 3 所示. 可以发现, 在识别率稳定在 70% 以上的前提下, 错误率降低幅度非常明显. 说明  $K_c$  值的确能反映出误差的变化趋势. DMC 磁航向精度也有小幅度的提高. 而识别率的稳定提升也意味着磁罗盘可用性的大幅度提高, 使组合航向系统尽可能减少在陀螺工作方式下的时

间, 使由于陀螺误差累计与漂移特性造成的航向误差降到最小. 这也是系统航向精度得以提高的重要原因.

对表 3 中的样本 1 进行模糊分类. 所得的各类中心坐标用于计算样本 2、3 各数据的分类矩阵  $\tilde{U}$  的隶属函数值, 以检验是否如期望的那样, 一组样本的分类结果可用于其它样本误差识别. 仍然假设  $K_c > 0.8$  时的数据为有效数据, 则识别结果如表 4 所示.

通过研究表 4 的数据可以发现, 模糊分类后, 识别率稳定在 70% 以上. 错误率明显下降, 航向精度得到大幅度提升. 和表 3 中样本 2、3 各自按样本本身分类的结果相比, 识别率、错误率及精度水平相当, 没有明显的变化. 组合航向系统航向误差仍然维持在约  $6^\circ$  的水平. 这表明, 尽管样本 1 与 2、3 代表的是不同的动态干扰情况, 但通过阈值判断初级识别后, 剔除了大量的无效样本数据. 保留下来的样本数据中, 基于 FCM 的分类方法能够发现罗差等级与特征量之间存在的统计特性, 而这种特性属于一种普遍现象.

表 3  $K_c$  值特性分析  
Tab. 3 Characteristics analysis of  $K_c$

样本	模糊分类前			模糊分类后		
	RP/%	MP/%	WP/(°)	RP/%	MP/%	WP/(°)
1	88.4	20.5	13.2	78.7	6.1	5.8
2	89.7	18.6	12.9	80.2	5.4	5.5
3	86.2	20.1	15.5	76.9	5.7	5.7

表 4 模糊分类后罗差识别结果  
Tab. 4 Recognition result of magnetic deviation after FCM

样本	模糊分类前			模糊分类后		
	RP/%	MP/%	WP/(°)	RP/%	MP/%	WP/(°)
2	89.7	18.6	12.9	75.1	5.8	5.7
3	86.2	20.1	15.5	73.9	5.9	5.9

## 5 结论

笔者在基于 DMC 和速率陀螺的组合航向系统基础上, 研究了基于阈值判断 + FCM 分类两级 DMC 动态罗差识别技术. 实验结果表明: 与单个磁罗盘相比, DMC 及基于阈值判断 + FCM 分类两级 DMC 动态罗差识别技术, 能显著提高磁罗盘对动态低频干扰的识别能力, 提高了磁罗盘在实际城市

交通环境中的可用性, 降低了组合航向系统由于陀螺误差累积和漂移特性而造成的航向误差. 提出的航向信息可信度参数  $K_c$ , 可为组合航向系统提供判别磁罗盘航向数据有效性的正确依据. 组合航向系统的航向精度得到提高, 航向误差小于  $6^\circ$ , 能够满足车辆导航系统的一般要求.

### 参考文献:

[1] CARUSO M J. Application of magneto resistive sensors

- in navigation systems[J]. *Sensors and Actuators*, 1997, 42(9): 15-21.
- [2] KIM J, LEE J G, SUNG T K, et al. Compensation gyroscope errors and GPS/DR integration [C] // *IEEE PLANS'96*. Piscataway: IEEE Press, 1996: 464-470.
- [3] LADETTO O, MERMINOD B. Digital magnetic compass and gyroscope integration for pedestrian navigation [C] // *Proc. of ION GPS'99*. Alexandria: [s. n.], 1999: 1569-1575.
- [4] 杨新勇, 黄圣国. 磁航向测量系统误差修正方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 466-469.  
YANG Xinyong, HUANG Shengguo. Study of error compensation method for magnetic heading measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 466-469.
- [5] 杨新勇, 黄圣国. 微型智能磁航向系统及误差补偿方法研 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(3): 244-248.  
YANG Xinyong, HUANG Shengguo. Development of intelligent magnetic heading sensor and analysis of its error compensation algorithm [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(3): 244-248.
- [6] 富立, 范耀祖. 智能航迹推算系统的研究 [J]. *航空学报*, 2000, 21(4): 299-302.  
FU li, FAN Yaozhu. Investigation of intelligent dead reckoning system [J]. *Hang Kong Xue Bao*, 2000, 21(4): 299-302.
- [7] KAO W W, TSAI C L. Adaptive and learning calibration of magnetic compass [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(11): 3073-3082.
- [8] WANG J S, GAO Y. A new magnetic compass calibration algorithm using neural networks [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(1): 153-160.
- [9] HOFF B, AZUMA R. Autocalibration of an electronic compass in an outdoor augmented reality system [C] // *Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*. Munich: IEEE Press, 2000: 159-164.
- [10] AZUMA R, HOFF B, SARFTY R, et al. A motion stabilized outdoor augmented reality system [C] // *Proc. of IEEE Virtual Reality*, Houston: IEEE Press, 1999: 252-259.
- [11] SAARINEN J, SUOMELA J, HEIKKILA S, et al. Personal navigation system [C] // *IEEE International Conference on Intelligent robots and Systems*. Sendai: IEEE Press, 2004: 212-217.
- [12] 郝振海, 黄圣国. 基于差分磁罗盘的组合航向系统 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(4): 377-380.  
HAO Zhenhai, HUANG Shengguo. Integrated heading system based on differential magnetic compasses [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(4): 377-380.
- [13] YU Jian, YANG Minshen. Optimality test for generalized FCM and its application to parameter selection [J]. *IEEE Trans. on Fuzzy System*, 2005, 13(2): 164-176.
- [14] PAL N R, PAL K, KELLER J M, et al. A possibilistic fuzzy *c*-means clustering algorithm [J]. *Fuzzy Systems*, 2005, 13(4): 517-530.
- [15] BRANDT M E, KHARAS Y F. An error convergence simulation study of hard vs. fuzzy *c*-means clustering [C] // *Proc. of the Third IEEE Conference on Fuzzy Systems*, IEEE World Congress on Computational Intelligence. Piscataway: IEEE Press, 1994: 1835-1839.

(中文编辑:唐 晴 英文编辑:付国彬)