

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201208034

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1673-4785.201208034.html>

SINS/DVL 组合导航系统的标定

于玖成¹, 何昆鹏², 王晓雪²

(1. 重庆航天火箭电子技术有限公司, 重庆 400039; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为提高智能水下机器人中的 SINS/DVL 组合导航系统定位精度, 需要准确标定出捷联惯性导航系统(SINS)和多普勒计程仪(DVL)之间的安装误差角以及 DVL 的刻度系数。该方法只需 AUV 潜水一段时间后浮出水面 2~3 次, 以接收的 GPS 定位信息作为参照, 经过迭代计算, 即可标定出 DVL 速度刻度系数和 SINS 与 DVL 之间的安装误差角。试验结果表明, 用该方法能简单有效地标定出组合导航系统的各项误差参数, 而且在多次标定修正后, 定位精度优于 7 m, 具有较高的实用价值。

关键词:组合导航; 惯性导航; 多普勒计程仪; 标定; 安装误差

中图分类号:TP311; TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2015)01-0143-06

中文引用格式: 于玖成, 何昆鹏, 王晓雪. SINS/DVL 组合导航系统的标定[J]. 智能系统学报, 2015, 10(1): 143-148.

英文引用格式: YU Jiucheng, HE Kunpeng, WANG Xiaoxue. Calibration for strapdown inertia navigation/Doppler velocity log integrated navigation system[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(1): 143-148.

Calibration for strapdown inertia navigation/Doppler velocity log integrated navigation system

YU Jiucheng, HE Kunpeng, WANG Xiaoxue

(1. Chongqing Aerospace Launch Vehicle Electronic Technology Co., Ltd, Chongqing 400039, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To ensure the position accuracy of the integrated navigation system consist of strapdown inertial navigation system(SINS) and Doppler velocity log in an autonomous underwater vehicle (AUV), it is necessary to accurately calibrate the misalignment angle between SINS and DVL and the scale coefficient of DVL. This calibration method only needs an AUV to expose above water surface for 2~3 times after having dived for about an hour. With the received GPS position as a reference information, the scale coefficient of DVL and the misalignment angle between SINS and DVL can be calibrated through iterative calculations. The experimental verification showed that all error parameters of the integrated navigation system can be calibrated easily and quickly by this method. It was concluded that after repeated calibration and error compensation, the position accuracy was better than 7m.

Keywords: integrated navigation system; inertial navigation; Doppler velocity log; calibration

自主式水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)体积小、机动灵活、活动范围广, 在海洋开发和国防领域的作用越来越突出^[1-3]。随着 AUV 应用的不断深入和应用领域的逐渐扩展, 其作业范围也越来越大, 对导航系统的要求也越来越高, 要求必须

具有自主、远程和高精度、长时间工作的能力^[4-5]。因为高精度导航是 AUV 获取有效信息的必要条件, 决定了 AUV 能否安全作业及返回^[6]。AUV 常用的导航方式大体上有如下几种: GPS 导航、航迹推算、惯性导航、地形匹配、重力场导航和组合导航等^[7]。

惯性导航系统(INS)不需要任何外来信息, 也不向外辐射任何信息, 可适用于任何工作环境^[11], 能实时输出载体的位置、速度和姿态等多种导航参

收稿日期: 2012-08-27. 网络出版日期: 2015-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(S1309059).

通信作者: 于玖成. E-mail: yu.jiucheng@163.com.

数^[12],并且导航数据平稳,短期稳定性好^[13]。

由光纤陀螺仪构成的捷联惯性导航系统(SINS)是新一代惯性导航设备,具有体积小、精度高、启动时间快等优点,因此,以光纤陀螺捷联式惯导系统为核心的导航系统能够较好地满足 AUV 自主导航的要求。但是 SINS 的误差随时间积累,为了进一步提高水下航行器长时间自主导航的精度,一般采用 SINS 与多普勒计程仪(DVL)组合的方式来提高系统精度。例如 Simrad 公司的 HUGIN 系列 AUV 导航系统和意大利的 SARA 号 AUV 导航系统均采用了 SINS/DVL 组合导航技术。Kearfott 与 RDI 公司联合研发的新一代的 SINS/DVL 组合导航系统 KN6051 的定位精度为 0.5% 航程(CEP),其中 GPS、INS 和 DVL 三者的数据通过卡尔曼滤波器在内部进行融合。对于 SIN/DVL 组合导航系统,如何准确标定出 SINS 与 DVL 之间的安装误差角及 DVL 的刻度系数,是确保组合导航系统能拥有较高精度的前提条件之一^[14]。文中通过大量的试验,总结出一种简单实用的标定方法,提高组合导航系统的定位精度。在 2012 年美国举办的第 15 届国际水下机器人竞赛中,由哈尔滨工程大学研制的装有 SIN/DVL 组合导航系统的智能水下机器人“敖明”号夺得了全球第 4 名,这也是亚洲参赛团队在历年比赛中的最好成绩。

1 SINS/DVL 组合导航系统

1.1 SINS 组成及性能

SINS 选用的石英挠性加速度计和光纤陀螺主要性能指标如表 1、2 所示。

表 1 加速度计性能指标

Table 1 The performance of accelerometer in SINS

类型	性能指标
输入量程/g	±25
二阶非线性系数/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-2}$)	<40
温度系数偏值/($\mu\text{g} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	<30
温度系数标度因数/($\text{ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	<30
零偏月稳定性/ μg	<50
刻度系数月稳定性/ppm	<30

表 2 陀螺性能指标

Table 2 The performance of FoG in SINS

类型	性能指标
角速率范围/($^\circ \cdot \text{s}^{-1}$)	±600
零偏稳定性/($^\circ \cdot \text{h}^{-1}$)	<0.01
随机游走系数/($^\circ \cdot \text{h}^{1/2}$)	<0.001
标度因数稳定性/ppm	<5

SINS 如图 1 所示,能快速测量 AUV 的姿态、速度和位置等导航信息,其性能指标如表 3 所示。



图 1 光纤捷联惯性导航系统外观示意图

Fig.1 The appearance of SINS based on FoG

表 3 SINS 性能指标

Table 3 The performance of SINS

类别	系统性能
初始对准时间/min	<10 (系泊或匀速直航)
水平姿态/($^\circ$)	<0.05° (1σ)
航向姿态/($^\circ$)	<0.1°sec Φ (1σ) (纯惯性导航)
数据发送频率/Hz	100
工作温度/ $^\circ\text{C}$	-40~60
功耗/W	<14
长宽高/mm ³	200×220×180
重量/kg	<4.2

1.2 DVL 性能

AUV 选用 LinkQuest 公司生产的 NavQuest600 型 DVL,该 DVL 广泛应用于 AUV 的水下导航、ROV 基站保持,ROV 速度、高度监测、海流监测、水下潜器导航、潜水员导航等。NavQuest 型 DVL 主要性能指标如表 4 所示。

表 4 NavQuest 600 性能指标

Table 4 The performance of NavQuest 600

类型	性能指标
频率/kHz	600
精度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1%
最大高度/m	140
最小高度/m	0.3
最大速度/kn	+/-20
标准深度/m	800
数据更新频率/Hz	5

2 SINS 及 DVL 的误差参数标定

图 2 为由哈尔滨工程大学自行研制的 AUV,密封舱内部装有光纤捷联惯性导航系统(SINS),DVL 装在 AUV 的前端正下方位置。



图 2 安装 SINS/DVL 组合导航系统的 AUV

Fig.2 The appearance of AUV installed the integrated navigation system

为确保组合导航系统能具有较高的定位精度, DVL 及 SINS 在安装后都需要进行标定, 得到其安装误差以及刻度系数, 使组合导航系统的输出更接近载体的真实运动情况。本文选取多点参考定位方法, 其原理是利用 GPS 系统测量 AUV 准确的经纬度和速度信息来估计 DVL 和 SINS 的各项误差。

2.1 DVL 安装误差标定

如图 3 所示, 标定时选择一片开阔水域, 设计 AUV 的预定航线为 OA, 尽量保持匀速直航, 在试航一段时间 (如 5 min), 到达初始测量就位点 B_1 , 开始标定, 此时 AUV 游弋的点设为 $B_i (i=1, 2, \dots)$, 从 B_1 点开始同时记录 GPS 时间、GPS 定位数据和组合导航系统定位数据, 共记录若干组数据 (B_1, B_2, B_3, \dots)。一般情况下, 该航段能正常接收 GPS 定位信号。但由于受风浪的影响, AUV 装载的 GPS 接收机效果可能比较差, 因此, 需要根据实际情况, 设定采集数据时间, 确保接收到高质量的定位信号后才进入下潜水航行阶段, 同时用有效的 GPS 信息更新 SINS 位置信息。

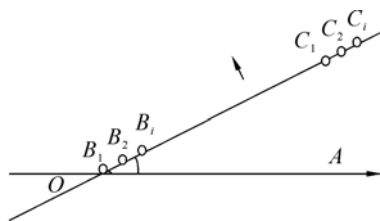


图 3 GPS 参考定位试验示意图

Fig.3 The experimental scheme of DVL calibration with GPS

然后 AUV 下潜, DVL 正常工作, 将所测量的速度输入到 SINS, 组合后得到组合定位信息, 此时, AUV 无法收到有效的 GPS 信息。在标定期间尽量保持航速、航向不变, 由于水流的作用, AUV 实际上沿着 BC 方向航行。考虑到实际应用中对位置、速度精度的要求, 需从 B_1 开始航行直线距离大于 5 km, 即到达 C_1 点, AUV 浮出水面, 重新接收 GPS 位置信息, 从 C_1 点开始按照预定程序记录 GPS 时间、位置和速度等数据, 设为 C_1, C_2, C_3, \dots , 这样就

完成了一条测线。据此往返多次, 即可完成若干条测线的标校工作, 整个试验的工作流程如图 4。

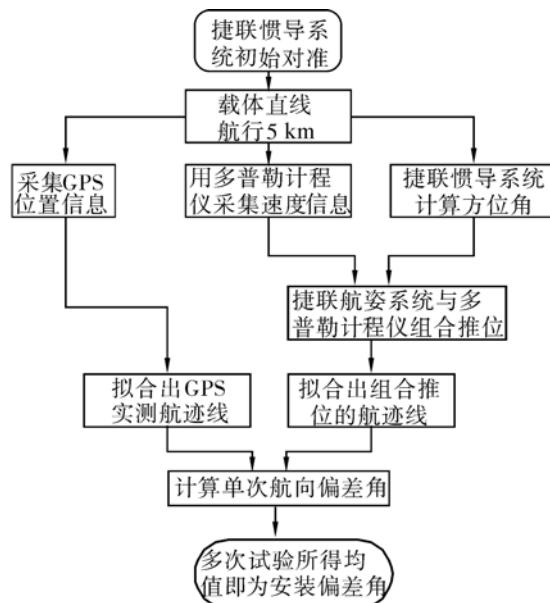


图 4 安装误差角标校流程图

Fig.4 Calibration process of misalignment between SINS and DVL

为了使得测量的数据更准确, 需要 AUV 做多条次航行, 而且入水和出水点的直线距离尽可能远。AUV 受水流的干扰, 有可能在一片区域内游动, 由一条测线就将得到若干组偏角值, 因此将全部测线中的偏角求平均就得到了需要的安装偏角。如果条件允许, 可以使 AUV 往返 2~3 次, 采用逐次逼近的方法, 可以精确修正安装误差角。该误差角精度有限, 可以在后续的 SINS 安装误差角标定中得到进一步修正。

2.2 DVL 刻度系数的标定

DVL 在水中由于受水温、盐度和环境噪声的影响, 而且本身的信号存在衰减、散射等情况, 因此, 测量的速度与真实值存在差异, 此时, 可以引入一个系数 k 对 DVL 的速度进行综合误差修正。在一条测线上可以测量得到通过 $A_1C_1, A_2C_2, \dots, A_iC_i$ 测量段的平均速度 v_{true} 和计程仪速度 v_{DVL} , 则速度修正系数为

$$1 + k = v_{true} / v_{DVL} \quad (1)$$

对多条测线测量的 k 值求平均就可以得到所需的速度修正系数。通过上述试验, 即可得到 DVL 速度的刻度误差修正系数。

2.3 SINS 安装误差标定

SINS 在装上 AUV 时不可避免地存在安装偏差, 这部分安装偏差也会加入到最终的系统误差中去, 不容忽视。SINS 安装误差可采用光学棱镜瞄准

的方法,在安装之前尽可能使捷联惯导系统的安装与 AUV 的艏艉线保持一致。在精确细致安装的基础上,再引入 GPS 信号,通过设计合理的航行轨迹,实时采集 AUV 精确的位置信息,完成对 SINS 的安装误差的标定。

如图 4 所示, AUV 航行于在静态水面上,由 O 点出发向 A 点行驶。由于 SINS 存在有安装误差,导致 AUV 偏离预定航迹 OA , 其真实航迹为 OB 。因此,图中预定航迹 OA 与真实航迹 OB 的夹角 α_1 就是 SINS 的安装误差角。 A 点和 B 点坐标可由 GPS 定位系统得知,计算得知 OA 与 AB 的距离,因此有 $\alpha_1 = \tan^{-1}(AB/OA)$ 。在 B 点重复以上实验,能够计算得出安装误差的小角度修正值 α_2 、 α_3 ,则安装误差角为: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ 。修正 2~3 次后,如果定位误差达到设定阈值,即可认为 SINS 的安装误差已经基本标定准确。

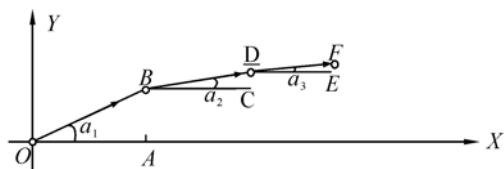


图 5 捷联惯性导航系统安装误差标定图

Fig.5 The map of calibration for SINS installation error

3 试验验证

针对实际航行环境,设计一系列 DVL 性能测试试验及水下航行试验,来验证用上述标定方法的可行性。

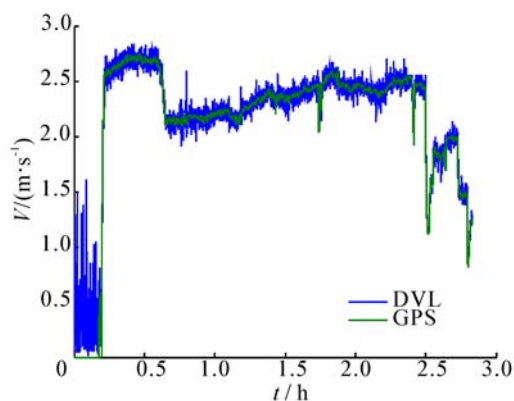
3.1 DVL 性能测试试验

标定 DVL 的安装误差角及其刻度系数后,以 GPS 的速度作为参照,测试 DVL 的性能,并标定 DVL 的速度误差。由于所选用的 GPS 定位精度优于 5 m,速度精度优于 0.1 m/s,该误差相对于组合导航系统较小,因此可以将其视为基准信号。

该试验可初步标定出 DVL 的安装误差及刻度系数,试验结果如图 6 所示, DVL 的测速精度在稳定航行阶段能够保持在 0.2 m/s (1σ) 之内,基本符合组合导航定位要求。试验也发现, DVL 在 AUV 系泊状态,噪声比较大,因此可以通过 SINS 的姿态、角速度等信息判断,在机动小时,适当增加低通滤波环节,减少 DVL 的速度噪声。

3.2 水下试验

将 SINS/DVL 组合导航系统安装于 AUV 内部,配重后并检查整个潜器的气密性,符合要求后,进行了第 1 次水下试航,其航行结果如图 7 所示。



(a) 速度测量结果

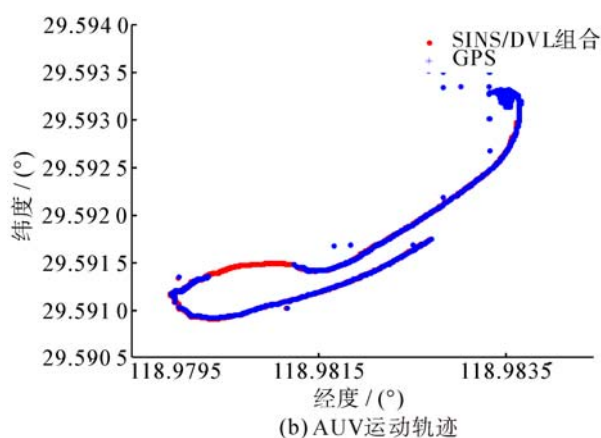


图 6 DVL 粗标定试验结果

Fig.6 Result of coarse calibration of DVL

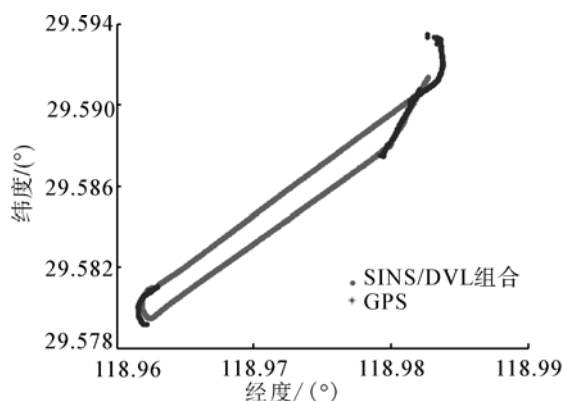


图 7 精确标定前航迹对比

Fig.7 The track comparison between GPS and SINS/DVL integrated navigation before fine calibration

由图 7 可知,当 AUV 浮出水面时,由于尚未对 SINS 进行安装误差标定,因此组合导航系统的推算位置与 GPS 的定位信息差别较大。因此对 SINS 进行第 2 次安装误差标定修正,以提高组合导航系统的定位精度。其中,先对 SINS 的安装误差进行大角度修正,再对 SINS 的安装误差进行第 2、3 次等小角度的修正。多次标定后的水下航行试验结果如图 8

所示。

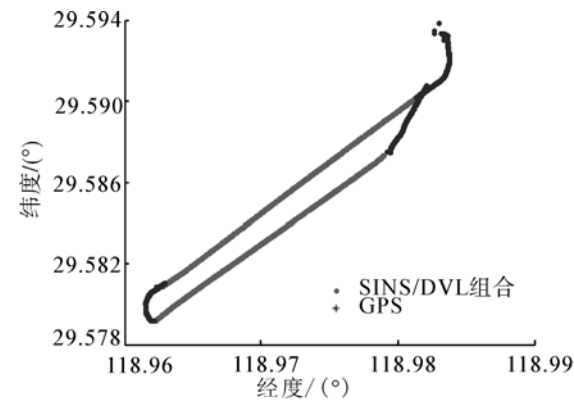


图 8 精确标定后 GPS 与组合导航系统航迹对比
Fig.8 The track comparison between GPS and SINS/DVL integrated navigation after fine calibration

对 SINS 进行安装误差的粗、精两级标定后,又进行了多个条次的试航,以检验标定的效果,当 AUV 浮出水面时,组合导航系统的推算位置与 GPS 的定位信息基本一致,但仍存在少许偏差。将标定的 3 个条次和验证的条次试验结果列入表 5 中,试验结果比较理想,定位误差优于 10 m,达到了预定目标。

由表 5 可知,随着 SINS/DVL 的安装误差和 DVL 速度刻度系数逐步精确,组合导航系统的定位精度逐步提高。根据实际应用经验,认为 AUV 在较长航行时间后(比如>1 h),由于组合导航系统的定位误差一般远大于 GPS 定位的精度,可以以 GPS 位置信息作为基准信息。但是,当组合导航系统的长航时定位精度接近 GPS 本身的定位精度时,可以结束标定,再次修正意义不大。

表 5 标定和验证试验条次试验结果
Table 5 The result of AUV position test

试航条次	SINS/OVL 经度/(°)	SINS/OVL 纬度/(°)	GPS 经度/(°)	GPS 纬度/(°)	距离差/m	航行距离/m
1	118.982 521	29.589 146	118.982 178	29.501 00	101	3 273
2	118.973 423	29.579 813	118.952 995	29.579 51	51	3 014
3	118.962 957	29.579 529	118.953 140	29.579 51	17	3 136
4	118.982 109	29.590 015	118.982 178	29.590 01	7	3 273

4 结束语

选取了多点参考位置方法,通过对比 GPS 与 SINS/DVL 组合导航系统的位置,反复迭代计算 SINS/DVL 的安装误差以及 DVL 的刻度系数。由实际的水下航行试验结果可知,SINS/DVL 的组合导航系统经过标定后,能够保证较高的导航定位精度,该方法简单、有效,具有一定的实用价值。

参考文献:

[1]冯正平.国外自治水下机器人发展现状综述[J].鱼雷技术, 2005, 13(1): 5-9.
FENG Zhengpin. A review of the development of autonomous underwater vehicles in western countries[J]. Torpedo Technology, 2005, 13(1) : 5-9.

[2]阳兵兵.观测型水下机器人结构及其惯性导航方法研究[D].杭州:浙江大学,2008:2-3.
YANG Bingbing. Research on the observation ROV structure and its strap-down inertial navigation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 2-3.

[3]余雄,唐晓东.国内外几种水下机器人的性能对比与分析[J].机器人集锦, 2001: 18- 21.

YU Xiong, TANG Xiaodong. Several underwater robots of performance comparison and analysis[J]. Robot Collection, 2001: 18- 21.

[4]MACRO D B, HEALEY A J. Command, control, and navigation experimental results with the NPS ARIES AUV[J] . IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4) : 466-476.

[5]俞建成,张艾群.基于多普勒和光纤陀螺水下机器人导航系统研究[J]. 船海工程, 2006(2) : 105-108.
YU Jiancheng, ZHANG Aiqun. Research on underwater vehicles navigation system based on DVL and fiber optic Gyro [J]. Ship Engineering, 2006(2) : 105-108.

[6]黄鸣敏.组合导航系统在水下潜器中的应用[D].南京:南京理工大学, 2007: 1-2.
HUANG Mingmin. The application of integrated navigation system in the underwater vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 1-2.

[7]周凯,易杏甫.水下机器人概述和发展应用前景[J].电子科技, 2010(24) : 283-284.
ZHOU Kai, YI Xingfu. The overview and development of AUV[J]. Electronic Technology, 2010(24) : 283-284.

[8]袁建平,罗建军,岳晓奎,等.卫星导航原理与应用[M].北京:中国宇航出版社, 2003: 9-15.

- [9] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-9.
- [10] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势[J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-131.
XU Yuru, LI pengchao. The development trend of underwater robot[J]. Nature Magazine, 2011, 33(3): 125-131
- [11] 张天光, 王秀萍, 王丽霞. 捷联惯性导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 5-10
- [12] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. USA: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2007: 1-188, 263-288.
- [13] 彭东立, 马海涛, 徐伟杰. DVL 在组合导航技术中的发展应用[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 417-418.
PENG Lidong, MA Haitao, XU Weijie. The development and application of DVL in integrated navigation technology[J]. Acoustic Technology, 2011, 30(3): 417-418.
- [14] 朱春云, 庄广琛. DVL 安装角估计方法在水下组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 75-78.
ZHU Chunyun, ZHUANG Guangcheng. DVL installation angle estimation and application in underwater integrated navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 75-78.

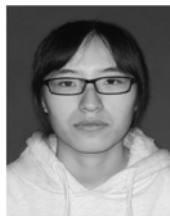
作者简介:



于玖成, 男, 1984 生, 助理工程师, 主要研究方向为控制理论与控制工程。



何昆鹏, 男, 1979 生, 副研究员, 主要研究方向为新性惯性器件及高精度导航。承担国家自然科学基金等项目多项, 获黑龙江省科技进步一等奖和国防科技进步二等奖各 1 次, 发表学术论文 30 余篇。



王晓雪, 女, 1989 生, 硕士研究生, 主要研究方向为捷联式惯性导航技术。

第 5 届全国智能信息处理学术会议

The 5th National Conference on Intelligent Information Processing

第 5 届全国智能信息处理学术会议(NCIIP2015)由中国人工智能学会知识工程与分布式智能专业委员会、中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会联合主办, 山东科技大学承办。该系列会议每 2 年举行一次, 现已成为国内智能信息处理领域最主要的学术活动之一。此次会议将为从事智能信息处理相关研究的学者交流最新研究成果、进行广泛的学术讨论和人员交流提供便利。

第 1~4 届 NCIIP 会议已于 2007 年、2009 年、2011 年、2013 年分别在昆明、徐州、太原、南宁成功举办, 第 5 届会议将由山东科技大学承办, 拟定于 2015 年 8 月 5~8 日在青岛召开。届时将邀请国内智能信息处理领域的著名学者做精彩报告, 欢迎高校、科研院所、企事业单位的研究人员和工程技术人员来山东科技大学参加会议, 欢迎各界人士踊跃投稿!

征稿范围:

1) 大数据知识发现; 2) 大数据挖掘; 3) 社会计算; 4) 多 Agent 系统; 5) 信息粒度计算; 6) 神经信息处理; 7) 模糊信息处理; 8) 粗糙集信息处理; 9) 多媒体信息检索; 10) 生物信息处理; 11) 知识获取与知识发现; 12) 知识表示; 13) 智能计算; 14) 机器学习; 15) 模式识别; 16) 自然语言理解; 17) 图像处理与理解; 18) 语音识别; 19) 智能决策; 20) 智能控制; 21) 智能系统; 22) 其他。

会议网站: <http://nciip2015.sdust.edu.cn/>