

自主移动机器人导航与定位性能测试设备研究^①

周 维^{②*} 李 斌* 张国伟^{***} 刘 鹏* 郑怀兵*

(* 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

(** 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 进行了基于轨迹分析方法测试自主移动机器人自主导航能力的研究,成功研制出了一种基于高精度 GPS 系统的机器人导航与定位性能测试仪器。从理论上论证了这一导航性能测试装备的软硬件设计、数据处理方法和导航测试指标的研究,并通过实验验证了该设备自身定位的精确性以及实验机器人进行快速自主导航性能测试的能力。

关键词 自主移动机器人, 轨迹分析, 自主导航, 性能测试, 测试装备

0 引 言

自主移动机器人的能力主要包括运动、操作、感知、决策等方面的能力,其中自主导航能力是感知能力中重要的一部分,也是自主移动机器人进行各项工作的前提。导航与定位能力是自主移动机器人的重要性能指标,如何准确测量和评估机器人的导航与定位能力是自主移动机器人研究的新热点。在机器人自主导航与定位研究上,国内外学者的主要方向是对无人系统自主性评估开展研究^[1-3],而对自主导航能力测试的研究比较少。由于这种情况,再加上机器人和环境的交互复杂,在自主导航性能测试上尚未形成统一的标准。

目前自主导航性能评估的方法有多种,包括模拟地形法、综合任务法、轨迹跟踪法等。其中轨迹分析法较为常用,但由于实际轨迹的复杂多变性,致使很难有一个能对所有轨迹进行分析处理的标准模型。哥伦比亚的 Muñoz 等利用路径跟踪法从机器人的安全性、路径距离和路径平滑性等方面评估了机器人的导航性能^[4]。美国卡内基梅隆大学(CMU)Koon 阐述了试验、评估和比较了参加美国国防高级研究计划局(DARPA)无人车大赛的 Highlander 和 Sandstorm 自主地面车辆的导航技术,定量评估了机器人的盲目跟踪、轨迹规划、跟踪辅助目标和基于规划路径的修正能力^[5]。美国国家标准与技术研究院(NIST)采用模拟地形的测试了移

动机器人的导航性能,并建立了无人系统自主级别(ALFUS)框架,从任务复杂度、环境复杂度和人机交互三方面对自主性做出了评价^[1]。国内方面,文献[6]提出了一种基于轨迹分析的计算评估方法,该方法通过车辆随机的特征期望衡量自主导航系统的性能。文献[7]提出了一种基于不确定性云模型的轨迹分析计算方法,该方法通过计算轨迹云模型的期望、熵和超熵来表示轨迹特征的基本度量、模糊性和随机性。国内外现有的研究基本上都是以评测理论方法为主。而本项目立足于实际应用,着重从软硬件设计和评估方法方面进行研究,在国内外率先研制出了一款自主导航性能测试设备。该设备以高精度 GPS 采集数据为基础,全方位涵盖数据存储、轨迹分析、状态显示、结果生成等各方面功能,方便对各种自主移动机器人导航性能的快速测试。

1 系统设计

自主导航测试系统整体分为在线数据采集和离线分析处理两大部分,系统总体设计如图 1 所示。

其中在线数据采集部分主要包括基站和移动站,两部分之间依靠大功率 PDL 无线数传电台通信,通信范围 5km,移动站平台实现数据采集功能。离线分析处理部分为 PC 端数据分析处理软件,完成对实验机器人自主导航性能的分析评估,它与移动站之间通过网口通信实现数据传输。

① 863 计划(2012AA041505)资助项目。

② 男,1989 年生,硕士;研究方向:机器人学,导航性能评估;联系人,E-mail:zhouwei@sia.cn
(收稿日期:2014-05-13)

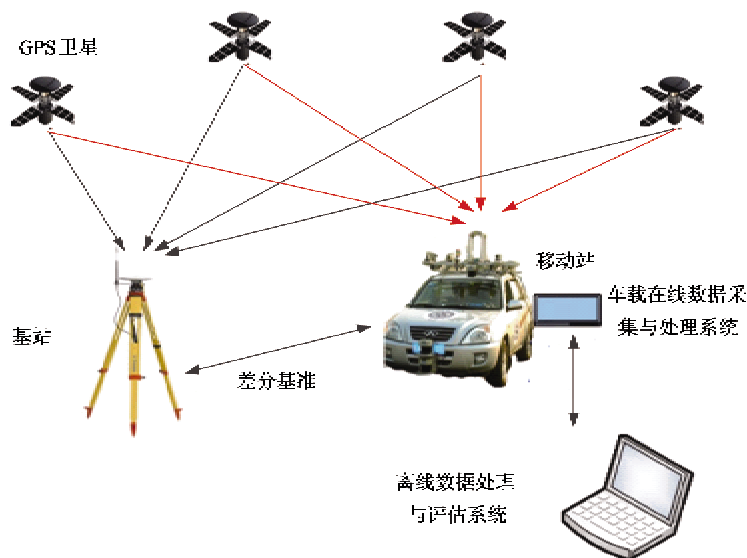


图1 自主导航测试系统总体设计

1.1 评测指标研究

国内外对于导航性能的评价指标没有一个统一的标准,“美国 DARPA 无人车挑战赛”以任务完成度和完成时间为标准;“中国智能车未来挑战赛”以4S(即安全性(Safety)、智能(Smartness)、平稳性(Smoothness)和速度(Speed))标准评价无人驾驶车辆完成测试任务情况,以完成时间、考点得分和人工干预综合打分评测无人车,并且无人车在直道无障碍情况下有最小速度要求。本文参考国内外大量文献并结合实际条件情况,在满足课题要求的情况下,确定从以下三方面评估移动机器人导航性能:

(1) 速度指标。包括移动机器人整个测试过程中的最大速度 $S_{\max}$ 、最小速度 $S_{\min}$ 和平均速度 S_{aver} 。

(2) 导航效率。包括移动机器人完成任务所耗总体时间 T ,整个过程轨迹的总体长度 P_L ,以及代表整个过程中机器人移动轨迹弯曲程度的曲率能量 B_E 。

(3) 定位精度。包括静态单点定位误差和动态轨迹误差两方面,其中单点定位误差由 X 误差、Y 误差和总体误差的最大值、期望、熵和超熵组成;动态轨迹误差由机器人方向偏差、机器人位置最大误差、误差均值、误差期望、误差熵和误差超熵几项指标组成。

其中曲率能量 B_E 代表整个路径的弯曲程度。导航系统规划出的平滑路径可减少转弯次数,提升运动效率。由于曲率能量 B_E 与路径的长度关系很大,因此曲率能量 B_E 可用于不同机器人或不同导航方法之间完成相同导航任务时进行比较,此时能

直观判断出更为平滑的导航路径。

设在任一点的曲率为 k , 任意一点 $(x_i, f(x_i))$ 的曲率为

$$k(x_i, f(x_i)) = \frac{f''(x_i)}{(1 + (f'(x_i))^2)^{3/2}} \quad (1)$$

曲率能量 B_E 可由每个点的曲率平方和平均得到:

$$B_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k^2(x_i, f(x_i)) \quad (2)$$

机器人自主导航的轨迹由于自身传感器的误差和不同环境的影响,都带有一定的不确定性。在社会科学和自然科学各方面都证明了正态分布的普适性,我们认为机器人导航轨迹的误差也是按照正态分布的。因此其误差分布我们采用李德毅院士提出的正态云模型数字特征 $Cloud(Ex, En, He)$ 作为描述方式^[8]。云模型能实现定性概念到定量数据间的转化,可以从采集的各点数据中提炼整体的导航性能特征。其中期望 Ex 表示误差的中心值,是最具代表性的点。熵 En 是误差的不确定度,代表了导航误差点的取值范围。超熵 He 可谓是 En 的熵,反映了误差点的离散程度,超熵越大,则误差点越分散。

当误差点满足正态分布时,令正态云的期望曲线方程为

$$y = \exp\left(-\frac{(x - Ex)^2}{2En^2}\right) \quad (3)$$

采用数学统计的方法,将采集的类正态数据(误差点)用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ 表示,利用逆向云发生器计算预测云模型的期望 Ex , 熵 En 和超熵 He 。计算方法如下:

$$\text{期望: } E x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

$$\text{熵: } E n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E x| \quad (5)$$

$$\text{方差: } S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - E x)^2 \quad (6)$$

$$\text{超熵: } H e = \sqrt{S^2 - E n^2} \quad (7)$$

具体证明过程见文献[9]。

1.2 硬件设计

硬件中的基站的主要功能是提升整个系统的定位精度,为数据采集的可靠性提供保障。移动站则完成对移动自主机器人的定位和数据采集功能,并辅助提供机器人运行的状态信息。

图 2 是基站硬件组成设计图。

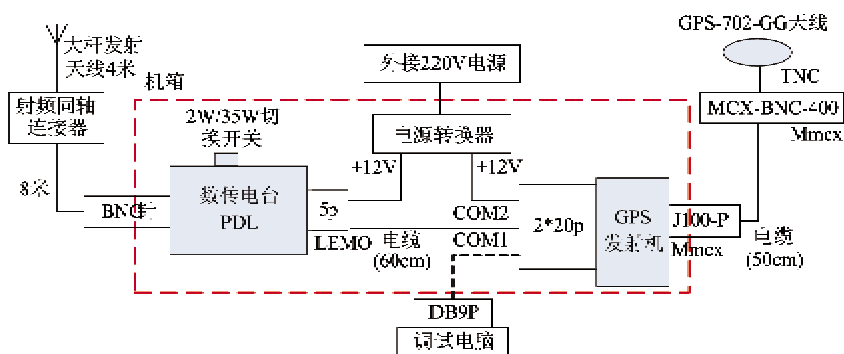


图 2 基站硬件组成设计图

移动站与基站之间采用实时动态 (real-time kinematic, RTK) 载波相位差分技术 (RTK 技术), 基站将采集的载波相位发送给移动站, 移动站进行求差解算坐标得到自身位置信息。基站硬件包括 GPS 发射机、GPS 天线、数传电台、大杆发射天线等。

基站与移动站之间通过大功率数传电台进行通

信, GPS 移动站实时接收 GPS 基站的修正量, 精确获取自主移动机器人的位置信息, 精度可达 2cm + 1ppm。移动站包括 GPS 接收机、GPS 接收天线, 接收数传电台和接收天线, 微型计算机系统以及触控显示设备。移动站硬件组成设计图如图 3 所示。

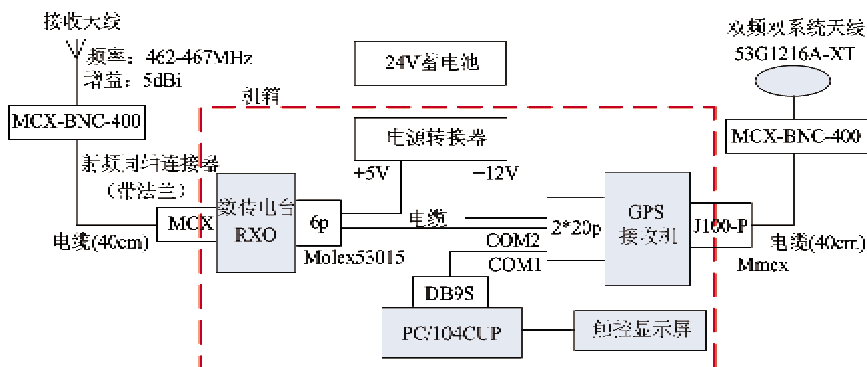


图 3 移动站硬件组成设计图

最终设计的自主导航测试设备实物如图 4 所示, 其中左为基站设备, 右为移动站设备。

1.3 软件设计

软件部分包括在线采集和离线处理两部分。其中移动站数据采集与处理软件是 GPS 移动站的核心, 该软件运行在 LX-3160 PC/104 上, 实现数据的采集、存储、状态信息显示、运动轨迹显示等各项功能。PC104 采用 vxWroks 嵌入式实时操作系统, 在线采集系统界面如图 5 所示。



图 4 自主导航能力测试设备

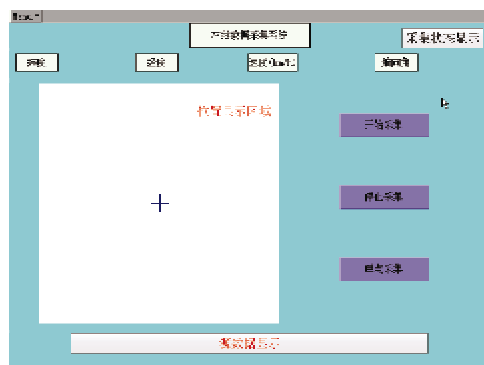


图5 移动站数据采集软件界面

移动站数据采集软件界面主要包括自主移动机器人路径图形显示区域、GPS 数据显示区域、数据采集操作区域。界面左边白色方框部分显示测试自主移动机器人的实时采集运动轨迹,中间十字表示起点位置。显示的轨迹以经纬度为坐标,分辨率为 0.000001 度(约合 10cm),并提供图像平移功能,方便观察轨迹。采集数据能进行静态单点定位数据采集和动态运动轨迹数据采集两种方式,可以对自主移动机器人导航定位性能进行多方面测试。

离线处理软件运行在 PC 端,以 OpenGL 为基础绘图框架重现机器人运动路径,在微软基础类(MFC)架构下搭建完成整个软件。该软件有以下功能:实现移动平台运动轨迹的生成,用于评估导航定位性能;实现轨迹创建与显示功能,用以对比路径;实现导航误差显示并对数据进行分析处理;实现机器人移动过程中速度和航向角显示;实现导航定位能力评估算法;实现单点定位能力分析等功能。软件界面如图 6 所示。图中,小圆点为测定数据结果,曲线为规划结果。此软件能够分析静态单点定位精度,对 4 种典型规划路径(圆形、直线、四边形和正弦曲线)进行动态轨迹分析,从而确定自主导航能力。

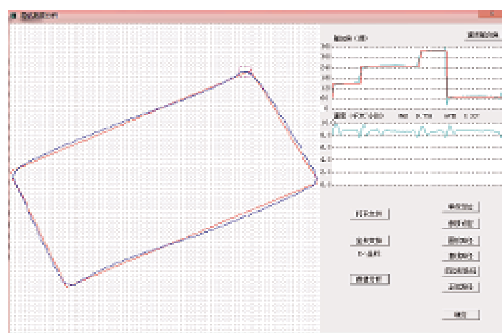


图6 离线数据分析软件主界面

1.4 测试方法

自主移动机器人导航与定位性能,主要由单点定位能力(即能否到达目标点)和动态轨迹跟踪能力(即如何到达目标点)两方面组成。因此,采用单点定位精度测试和动态轨迹跟踪测试两类方法,能对机器人导航与定位性能做出比较全面的测试。

静态单点定位测试采用先为移动机器人预设目标点位置,然后多次实验记录移动机器人达到目标点情况。根据多次采集移动机器人实际到达位置数据,和预设目标位置数据进行 X 方向、 Y 方向、总体位置进行分析对比,计算其误差最大值、期望、熵及超熵,从而评估机器人的定位能力。

动态轨迹测试方法是选取4种规划路径对机器人进行分别测试,即圆形路径、直线路径、正弦曲线路径和四边形路径。这能体现机器人在固定曲率、零曲率、变曲率及转弯闭环回路等各种轨迹下的自主导航性能。计算的主要方法是分析对比规划路径与机器人实际路径之间的偏差。对这4种路径分别采取不同的误差计算方法:

(1) 圆形路径:圆形路径轨迹误差通过计算实际轨迹点到规划圆心之间的距离与规划半径之差获得,其正负分别代表在圆外和圆内。

(2) 直线路径:设规划直线坐标为 $((X_1, Y_1), (X_2, Y_2))$,机器人轨迹点为 (x_i, y_i) ,直线路径轨迹误差主要采用轨迹点到设定直线的距离,即

$$d = - \frac{((Y_2 - Y_1) \times x_i + (X_1 - X_2) \times y_i + (X_2 \times Y_1 - X_1 \times Y_2))}{\sqrt{((Y_2 - Y_1)^2 + (X_1 - X_2)^2)}} \quad (8)$$

(3) 四边形路径:首先把其分为4条直线,再在每条直线范围内采用上面直线路径误差计算方法分别计算出每条边对应的误差,而后整合数据得出总体误差。

(4) 正弦路径:规划正弦路径首先需设定为朝向正东方向,方便后续计算与测量。正弦曲线采用

$$y = a \times \sin(\pi \times x/b) \quad (9)$$

即 $2a$ 为曲线宽度, $2b$ 为曲线周期长度。设 (X_0, Y_0) 为正弦路径起始位置,轨迹误差采用 y_i 与

$$a \times \sin((x_i - X_0) \times \pi/b) \quad (10)$$

之差,其中正代表在正弦曲线上方。

计算完动态运行轨迹的误差之后,根据误差数据计算整个误差的最大值、期望、熵、超熵和误差分布情况。

2 实验验证

本文进行了多次自身精度验证和测试实验机器人自主导航性能两类试验。试验证明,本文给出的移动机器人自主导航性能测试设备具有极高的定位精度性能,能成功完成测试机器人自主导航性能任务。

2.1 设备自身定位精度验证试验

首先对设计的测试装备进行自身精度验证实验,实验选取室外空旷地点并远离高大建筑物以减少其他干扰 GPS 信号的影响。精度验证试验进行了多次圆形和直线测试,现以其中一组圆形实验为例(见图 7)。



图 7 圆形精度实验图

实验方法是先把基站设立在空旷开阔地点,方便与移动站之间的通信,确保两者之间无建筑物遮挡。把测试横杆一端固定,使另一端能绕其旋转,然后固定 GPS 移动站于测试横杆上,测量 GPS 接收天线与测试横杆固定点距离即为圆形半径。旋转横杆可得到一个标准圆形,对比采集结果可测其自身精度,结果见图 8。

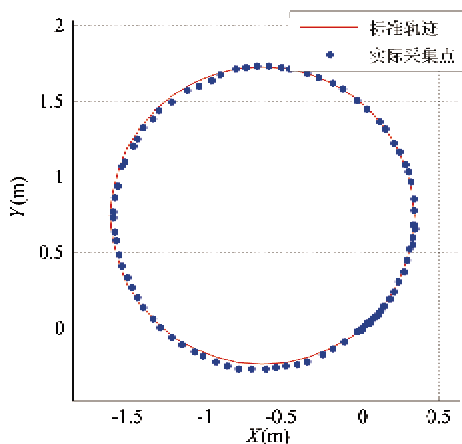


图 8 离线分析软件重现轨迹图

自身精度圆形实验选取某固定位置作为圆心,半径为 0.98m,测试生成结果见表 1、表 2。设备平均误差 1.0cm,99% 概率集中在 $\pm 3\text{cm}$ 之间,达到了预期设计的精度,确保了自身设备的高精度性。

表 1 自身精度测试实验结果

最大速度(km/h)	0.518
平均速度(km/h)	0.252
最小速度(km/h)	0.045
最大误差(m)	0.031
平均误差(m)	0.010
误差期望(m)	-0.002
误差熵(m)	0.012
误差超熵	0.004
任务总体耗时(s)	91
实际轨迹长度(m)	6.36
轨迹曲率能量	46.921

表 2 自身精度测试实验误差概率分布

范围(m)	概率
< -0.09	0
$-0.09 \sim -0.07$	0
$-0.07 \sim -0.05$	0
$-0.05 \sim -0.03$	0
$-0.03 \sim -0.01$	0
$-0.01 \sim 0.01$	0.26087
$0.01 \sim 0.03$	0.597826
$0.03 \sim 0.05$	0.130435
$0.05 \sim 0.07$	0.01087
$0.07 \sim 0.09$	0
> 0.09	0

2.2 机器人导航能力测试实验

选择沈阳自动化研究所研制的野外科考自主移动机器人进行实验,实验场地选为户外湖面冰面,以保证实验过程中场地开阔无遮挡,提高 GPS 定位精度。首先为机器人设定 4 个顶点坐标,让机器人依次到达指定地点,规划路径为四边形路径,测试设备安装在机器人上全程采集数据。实验结果如图 9 ~ 图 12 所示,其中图 9、图 10 为实际数据与理想数据对比,图 11 和图 12 为实际采集数据。

最终生成的实验结果见表 3、表 4。该机器人自主导航精度约为 2m,其中最大误差为 3.939m。误差期望 1.177m 说明该机器人运行轨迹总体偏外;

曲率能量很小,表示该机器人路径选择优秀,运行稳定,轨迹较为平滑。

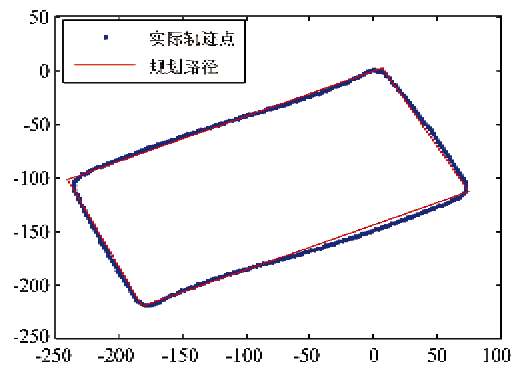


图9 自主导航测试实验轨迹对比图

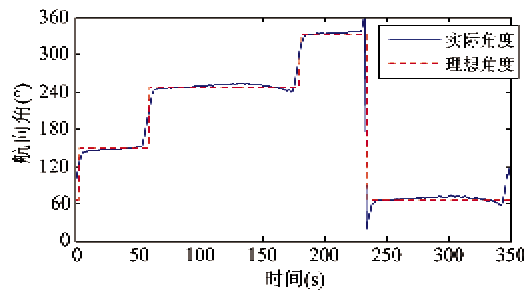


图10 自主导航测试实验方向对比

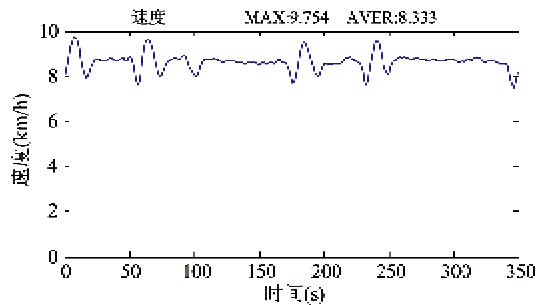


图11 自主导航测试实验速度统计

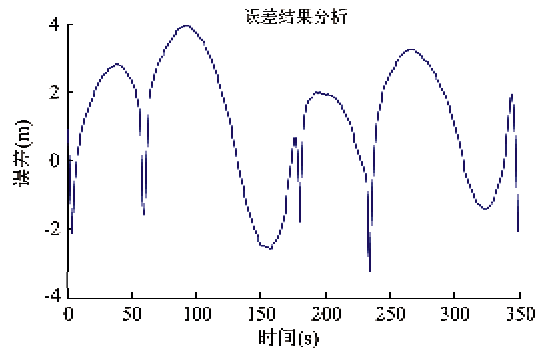


图12 自主导航测试实验误差分布

表3 自主导航测试实验结果

最大速度(km/h)	9.754
平均速度(km/h)	8.337
最小速度(km/h)	7.438
最大误差(m)	3.939
平均误差(m)	1.917
误差期望(m)	1.177
误差熵(m)	1.944
误差熵熵	0.675
任务总体耗时(s)	348
实际轨迹长度(m)	805.883
轨迹曲率能量	0.002

表4 自主导航测试实验误差概率分布

范围(m)	概率
< -4.5	0
-4.5 ~ -3.5	0
-3.5 ~ -2.5	0.017192
-2.5 ~ -1.5	0.080229
-1.5 ~ -0.5	0.126074
-0.5 ~ 0.5	0.111748
0.5 ~ 1.5	0.131805
1.5 ~ 2.5	0.237822
2.5 ~ 3.5	0.223496
3.5 ~ 4.5	0.071633
> 4.5	0

3 结 论

本研究基于轨迹分析方法和高精度 GPS,研制了一款用于测试机器人自主导航性能的专业设备,能够从多方面测试机器人的导航性能。该设备操作简单方便,分析结果快速直观,能够帮助研究人员方便快捷地了解机器人自主导航性能,为其调试和改进机器人的导航性能带来许多便利。

该测试系统目前还存在两点不足:一是由于采用 GPS 为数据来源,因而在室内目前无法使用,在室外也需要较为空旷环境,否则将影响定位精度,这使得该设备在使用条件上有一定的局限性。二是自主导航能力测试方法有待进一步优化,目前缺少机器人自适应环境程度与人机交互程度的测试,对自主程度方面测试较为薄弱。下一步工作中将对上述两点展开继续的研究。

参考文献

[1] Huang H M, Albus J, Messina E, et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems; Interim report. In: Pro-

- ceedings of SPIE, Bellingham, USA, 2004. 386-397
- [2] 王越超, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法. 科学通报, 2012, (15):1290-1299
- [3] 杨哲, 张汝波. 无人系统自主等级模糊评价方法. 小型微型计算机系统, 2009, 30(10):2043-2047
- [4] Muñoz N D, Valencia J A, Londoño N. Evaluation of Navigation of an Autonomous Mobile Robot, 2007. 15-21
- [5] Koon P L. Evaluation of Autonomous Ground Vehicle Skills, Carnegie Mellon University, 2006. 4-8
- [6] 王勇鑫, 钱徽, 金卓军等. 基于轨迹分析的自主导航性能评估方法. 计算机工程, 2011, 37(6):141-144
- [7] 阎岩, 唐振民, 刘家银. 基于不确定性分析的自主导航轨迹评测方法. 机器人, 2013, 35(2):194-199
- [8] 邸凯吕, 李德毅, 李德仁. 云理论及其在空间数据挖掘和知识发现中的应用. 中国图像图形学报, 1999, 4(4):929-935
- [9] 王兆红, 肖孟强, 李燕等. 类正态分布数据云模型的预测算法. 计算机应用与软件, 2009, 26(9):78-79

Research on the equipment for test of an autonomous robot's navigation and positioning performance

Zhou Wei^{***}, Li Bin^{*}, Zhang Guowei^{***}, Liu Peng^{*}, Zheng Huaibing^{*}

(^{*}The State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{**} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

A study on measurement and test of the autonomous navigation and positioning capabilities of an autonomous mobile robot was performed based on the trajectory analysis, and a kind of equipment for test of a mobile robot's autonomous navigation and positioning performance based on high-precision GPS systems was designed and implemented successfully. The device's hardware and software design, data processing methods, and navigation test indicators' determination were expounded theoretically, and the device's localization accuracy for itself, and quick testing ability for an experimental robot's autonomous navigation performance were verified by experiment.

Key words: autonomous mobile robot, trajectory analysis, autonomous navigation, performance testing, testing equipment