

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007107

服务机器人激光测距组件的环境可靠性模型 及其定量评价方法研究*

杨孟骐¹, 赵爽², 白晓帆³, 王如志¹

(1. 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124; 2. 中国家用电器研究院 北京 100037;
3. 广州智能装备研究院有限公司 广州 510635)

摘要:服务机器人行业发展迅速,其核心零部件激光测距组件可靠性直接影响整机性能。本文基于服务机器人的应用环境,对激光测距组件工作特性进行研究,建立了测距组件普适的环境可靠性模型及其试验评价方法。以测距精度作为研究对象,以可靠性评价因子 R_s 作为评价指标,提出了测距组件可靠性函数通用表达式。采用自主搭建的测距精度检测平台,对5种型号的组件样品进行了测距精度环境可靠性试验及定量评价。评价结果显示仅有1款样品的 R_s 值小于1,表明其环境可靠性水平较高;其他4款样品在防水防尘及盐雾试验后的 R_s 均大于1,存在失准或失效现象,暴露了产品在设计及应用中的薄弱环节。试验及评价结果进一步验证了环境可靠性模型及其定量评价方法的通用性及可行性。

关键词:服务机器人;测距精度;激光测距组件;可靠性;定量评价

中图分类号: TH711 TN958.98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.60

Research on environmental reliability model and its quantitative evaluation method of service robot laser ranging modules

Yang Mengqi¹, Zhao Shuang², Bai Xiaofan³, Wang Ruzhi¹

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. China Household Electrical Appliances Research Institute, Beijing 100037, China; 3. Guangzhou Intelligent Equipment
Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

Abstract: The service robot industry is developing rapidly. Laser ranging module is a core component of the robot, and its reliability directly affect the performance of the whole machine. Based on the working environment of service robot, this paper studied the operating characteristics of laser ranging modules, and established the universal environmental reliability model and test evaluation method of ranging modules. Taking ranging accuracy as the research object and the reliability evaluation factor R_s as the evaluation merit, the general expression of the reliability function for ranging modules was proposed. The environmental reliability test and quantitative evaluation of the ranging accuracy of five types laser ranging module samples were carried out with the self-built ranging accuracy test platform. Evaluation results showed that the R_s value of only one sample was less than 1, which indicated that its environmental reliability level was high, the R_s values of the other four samples were greater than 1 after the waterproof, dustproof and salt spray tests, which showed the phenomenon of inaccuracy or failure and exposed the weak parts in the design and application of the products. The test and evaluation results further verified the universality and feasibility of the environmental reliability model and its quantitative evaluation method.

Keywords: service robot; ranging accuracy; laser ranging module; reliability; quantitative evaluation

收稿日期: 2020-11-11 Received Date: 2020-11-11

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFF0210000) 项目资助

0 引言

科技的进步推动着人工智能产业的发展,结合人工智能算法的服务类机器人日益受到广大消费者的青睐^[1-3]。服务类机器人智能化的一大重要表现在于其高效的路径规划能力,实现这一过程有两个核心部分,一部分是可实现服务机器人路径规划及避障功能的同时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)算法^[4-5];另一部分为读取目标距离的激光测距组件。目前传感器主要类别有激光雷达传感器、双目视觉传感器和超声波传感器等^[6],激光测距雷达结构简单、成本低廉,在短距离测量上已得到广泛的应用^[7]。通常所采用的测距方法有脉冲法、三角法、相位法、干涉法。其中,相位法及干涉法虽测量精度较高,但其搭建环境较为复杂,成本较高,故多用于环境稳定且精度需求高的测试场景^[8-9],而脉冲法和三角法原理的激光测距组件价格低廉、性能优异,常被应用于服务机器人的距离测绘和防撞领域^[10-11]。

目前针对激光测距组件可靠性研究已经有了些许突破^[12-13],然而激光测距组件应用于服务机器人中存在诸多复杂的应用场景^[14],往往需结合复杂的工作环境对其可靠性进行分析,而目前针对这一领域的可靠性评价方法不足。测距精度是激光测距组件的关键评价因素之一,尽管采用粒子群优化处理^[15]以及标量复合分析^[10]等方法可以有效降低测距组件误差,但其通常需要处于相对稳定的测试环境,由于服务机器人应用于动态工作环境,导致服务机器人激光测距组件精度很难提升,并且一些服务机器人工作环境苛刻,更易增加系统测距误差,提高服务机器人发生意外的风险。针对这些现状,李现坤等^[16]通过改变激光雷达的测试角度,及测试距离,检测其对于测距误差的影响,研究结果表明针对其测试的测距组件,测试距离每增加1 m,测距误差增大2.5 μm;入射角度大于45°时,测距误差呈明显上升趋势。孙国强等^[17]通过选取高可靠器材、简化设计等方式提高雷达系统可靠性,并计算出优化后雷达平均无故障时间为250 h。也有学者研究了各种不利环境因素如粉尘^[18-19]、雨水^[19-20]、雾气^[21]等条件下激光测距组件的测距精度变化。然而针对不同原理及用途的激光测距组件,其评价方法较为多样,缺少对于服务机器人激光测距组件统一、便捷的可靠性定量分析方法。

本文以“测距精度”作为评价指标,首先提出了服务机器人激光测距组件普适的环境可靠性模型,针对不同类型激光测距组件,实现了统一的可靠性测试定量评价;其次建立了一套系统的服务机器人激光测距组件环境可靠性试验方法,对服务机器人工况下可能

遇到的环境因素进行模拟;采用自主搭建的测距精度检测平台对清洁服务机器人激光测距组件的测距误差进行分析;根据测试结果,总结出清洁服务机器人激光测距组件在特殊工况下的承受能力,并对测距精度及失效条件进行了分析,验证了所提出的环境可靠性模型及定量评价方法的可行性。该方法可以暴露产品在研发、制造、材料等方面的缺陷和薄弱环节,对于发展新一代高性能、高可靠的服务机器人激光测距组件起到重要促进作用。

1 环境可靠性模型及检测方法

1.1 服务机器人激光测距组件环境可靠性模型

1) 可靠性评价因子及其环境影响因素

对于服务机器人激光测距组件的可靠性 R 所包含的评价因子主要有测距精度(R_s)、响应速度(R_r)及使用寿命(R_f)等。可靠性评价因子函数表达式如下:

$$\begin{bmatrix} R_s \\ R_r \\ R_f \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_0 & \dots & s_m \\ r_0 & \dots & r_m \\ f_0 & \dots & f_m \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}_{n \times (m+1)} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ P_T \\ P_m \\ P_v \\ \dots \end{bmatrix}_{(m+1) \times 1} \quad (1)$$

式中: s_0 、 r_0 和 f_0 分别表示测距精度、响应速度及使用寿命可靠性评价因子的初始判定值; $s_{0 < i \leq m}$ 、 $r_{0 < i \leq m}$ 、 $f_{0 < i \leq m}$ 表示相较于 s_0 、 r_0 、 f_0 的试验误差修订值; n 为可靠性评价因子数量; m 为环境可靠性测试项数;对于服务机器人激光测距组件,服役过程中影响可靠性评价因子的主要环境影响因子包括高低温(P_T)、湿热(P_m)、振动(P_v)、水尘(P_w)、盐雾(P_s)等。

2) 可靠性建模方法与理论

测距精度决定了服务机器人定位、移动及相关智能操作等核心功能,但是与响应速度、使用寿命等参数相比,在服役过程中,难以直接观察其变化。在本文中,将主要针对服务机器人激光测距组件测距精度可靠性进行定量分析评价。根据式(1)可推导出服务机器人激光测距组件测距精度可靠性评价因子 R_s 函数表达式为:

$$R_s = \frac{\bar{\delta}_0}{\delta_s} + \sum_i \frac{\lambda_i(\bar{\delta}_i - \bar{\delta}_0)}{\delta_s} \quad (2)$$

其中, $\delta = \frac{\Delta l}{l} \times 100\%$ 为测距精度,定义为目标距离的偏差的百分比, l 为测距目标距离, Δl 为测距误差。

$\bar{\delta}_0$:为未经过环境可靠性试验前,样品初始的平均测距精度。

δ_s : 为一定测试范围内样品合格测距精度。

$\bar{\delta}_i$: 为分别进行某单项环境可靠性试验(如高低温、湿热、盐雾、振荡、防水防尘等)后激光测距组件的平均测距精度。

λ_i : 为环境参数权重因子, 可通过 $\lambda_i = \frac{T_i}{T}$ 计算得出,

其中, T 为激光测距组件实际工作总时长; T_i 为特定环境因素下设备运行时长, 该数值与实际工作中该环境变量出现频率紧密相关。

$\bar{\delta}_0/\delta_s$: 为式(1)中的 s_0 , 既归一化后的测距精度初始判定值。

$\bar{\delta}_i - \bar{\delta}_0$: 为某项可靠性试验结束后平均测距精度增量, 若该项环境可靠性试验后测距功能不正常, 则令 $\bar{\delta}_i - \bar{\delta}_0 = 10\delta_s$ 。

$(\bar{\delta}_i - \bar{\delta}_0)/\delta_s$: 为式(1)中的 s_i , 既归一化后的测距精度修订值。

此处, 将可靠性级别分为合格、失准、失效 3 个级别, 利用式(2)可计算测距组件测距精度可靠性, 若 $R_s \leq 1$, 则该产品合格; 若 $1 < R_s < 10$, 则该产品失准; 若 $R_s \geq 10$, 则该产品失效。

采用计数抽样检测方法, 对激光测距组件测距精度进行抽样检测, 结合式(2)所给出的测距精度可靠性评价因子 R_s 函数及其判定标准, 其不合格产品比例为:

$$p = d/n \times 100\% \quad (3)$$

式中: p 为每单位产品不合格数; d 为样品中不合格数, n 为样品量。对比激光测距组件的接收质量限 (acceptance quality limit, AQL) 可对样品测距精度可靠性进行评价。

1.2 试验方法及流程

针对服务机器人工作过程中可能遇到环境不利因素, 设计如图 1 所示的服务机器人激光测距组件环境可靠性检测流程, 包括样品初始化、外观及功能性检测、环境可靠性试验等。每项环境可靠性试验后需对样品进行恢复检查, 随后对样品评价因子进行定量分析评价。最后结合产品外貌、功能性及评价因子性能检测结果对其可靠性进行评估。

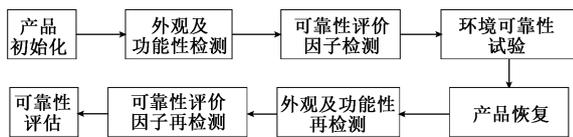


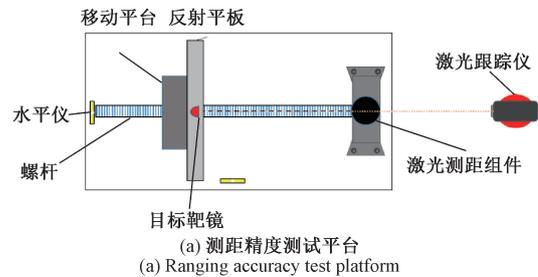
图 1 环境可靠性检测流程

Fig. 1 Flow of environmental reliability test

2 基于测距精度的环境可靠性定量分析方法

2.1 测距精度检测平台搭建

距离精度测试采用自主设计搭建的检测平台及实际操作图如图 2 所示, 在水平硬质结构上固定直线位移台, 采用电机驱动螺杆转动使得移动平台可延固定方向一维移动, 在直线位移台的移动平台上固定反射平板, 反射平板所在平面应垂直于螺杆方向, 在直线位移台末端固定服务机器人激光测距组件, 激光测距组件几何中心应垂直于平台中心轴线上方。通过控制移动平台线性平移, 可以使得反射平板与激光测距组件产生相对位移, 进而采集激光测距组件的距离测试数据。由于激光追踪仪误差精度可达 10^{-6} m, 而服务机器人激光测距组件误差精度仅为 10^{-3} m, 因此可以采用激光追踪仪对服务机器人激光测距组件测距误差进行评价^[22]。



(b) 测距精度测试平台实际操作图
(b) Actual operation diagram of the ranging accuracy test platform

图 2 服务机器人激光测距组件测距精度测试平台

Fig. 2 Ranging accuracy test platform of service robot laser ranging module

固定激光追踪仪并在反射平板正上方固定目标靶镜, 目标靶镜可以将激光追踪仪光束原路径返回, 反射平板移动至与测距组件外壁接触, 标定目标靶镜三维空间位置 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, 其空间位置由下式给出。

$$P = \begin{cases} D \sin \theta_v \cos \theta_H \\ D \sin \theta_v \sin \theta_H \\ D \cos \theta_v \end{cases} \quad (4)$$

式中: D 为测试目标靶镜距离; θ_v 为激光追踪仪与目标靶镜竖直方向夹角; θ_H 为激光追踪仪与目标靶镜水平方向夹角。移动反射平板至测距组件显示读数, 记录激光追踪仪

三维读数 P_1 , 记录测距组件所检测反射平面的距离参数 X_1 , 以固定步长移动反射板, 依次记录测距组件距离读数 $X_2, X_3 \dots$ 以及激光追踪仪三维空间读数 $P_2, P_3 \dots$ 计算反射靶球空间位移量可求得目标距离 $l = R_x = |P_x - P_0|$, 激光测距组件在某一特定距离的测距误差 $\Delta l = |R_x - X_x|$ 。

2.2 环境可靠性试验验证

选取清洁服务机器人用激光测距组件作为环境可靠性试验的测试对象, 以此验证所提出的环境可靠性模型及其定量评价方法的可行性。被测试激光测距组件样品为国内市场可采购的清洁服务机器人用激光测距组件, 其具体参数如表 1 所示。

表 1 清洁服务机器人激光测距组件样品参数
Table 1 Clearing service robot laser ranging module sample parameters

样品编号	测距原理	扫描频率/Hz	测距范围/m	扫描角/度(°)	激光线数
A	三角法	8	0.1~12	360	单线
B	三角法	7	0.2~16	360	单线
C	三角法	12	0.2~10	360	单线
D	三角法	10	0.2~28	360	单线
E	脉冲法	20	0.1~5	360	单线

样品表面需进行清洁并对其外壳进行检查记录, 包括是否有气泡、裂纹等缺陷。对激光测距组件检测信号接收与输出进行检测, 包括是否能进行距离检测, 数据输出与系统是否兼容, 是否能对输入信号做出相应反应。针对清洁服务机器人运输及工作过程中可能遇到高低温运行、潮湿环境运行、跌落等意外情况, 参照表 2 对清洁服务机器人激光测距组件样品依次进行不同环境可靠性检测。图 3 所示为样品测试环境参数图及环境模拟试验图。

2.3 测距精度环境可靠性定量分析

如表 3 所示为不同样品初始误差及环境可靠性试验测试后测距误差平均值以及方差, 测试步长为 200 mm, 测距范围为 0~2 000 mm, 每个样品采集 10 组数据。可以观察到高低温环境测试对样品性能及测距误差影响较小, 表明激光测距组件对极端温度环境有较好的防护能力。样品 A、B 和 C 初始测距误差较小, 平均误差均在 5 mm 以下, 并且随测试距离的提升, 其测距误差保持较低的水平, 并未发生离散, 表明样品长程测距精确度较高。样品 A 经环境可靠性测试后测距误差均小于 5 mm, 然而其防水防尘及盐雾试验中功能性检测失效。样品 B 和 C 同样在防水防尘测试中功能性检测失效, 其余环境

表 2 环境可靠性试验参数

Table 2 Environmental reliability test parameters

环境现象	试验规定	试验配置
高温	温度: 55℃ 升温速度: <10℃/min 时间: 16 h	GB/T 2423. 2-2008 《电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 B: 高温》
低温	温度: -10℃ 升温速度: <10℃/min 时间: 16 h	GB/T 2423. 1-2008 《电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 A: 低温》
湿热	温度: (40±2)℃ 升温速度: <10℃/min 湿度: (93±3) % RH 时间: 48 h	GB/T 2423. 3-2006 《电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 Cab: 恒定湿热试验》
冲击	峰值加速度: 15 g 脉冲持续时间: 11 ms 脉冲波形: 后峰锯齿波 方向: ±X、±Y、±Z 六方向 次数: 每方向 3 次, 共计 18 次	GB/T 2423. 5-1995 《电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 Ea 和导则: 冲击》
振动	频率范围: 10~55~10 Hz 振动方向: X、Y、Z 三轴向 振动幅值: 位移幅值 0.35 mm 扫频循环次数: 每方向 20 次, 共计 60 次	GB/T 2423. 10-2008 《电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 Fc: 振动(正弦)》
防水 IPX6	喷嘴内径: 12.5 mm 水流量: 100 L/min 水压: 按水流量调节 主水流中心部分: 离喷嘴 2.5 m 处, 直径约为 120 mm 的圆 外壳表面喷水时间: 1 min 试验时间: 3 min 喷嘴距外壳表面距离: 2.5~3 m	GB/T 4208-2008 《外壳防护等级(IP 代码)》
防尘 IP5X	滑石粉密度: 2 kg/m ³ 网孔径: 75 μm 粉尘密度: 2 kg/m ³ 使用次数: <20 次 试验时间: 8 h	GB/T 4208-2008 《外壳防护等级(IP 代码)》
盐雾	温度: (35±2)℃ 沉降率: 1~2 ml/80 cm ² ×h 试验时间: 24 h	GB/T 2423. 17-2008 《电工电子产品环境试验第 2 部分: 试验方法 试验 Ka: 盐雾》

可靠性试验后测距误差仅小幅度增加。样品 D 和 E 初始测距误差较大, 但测试过程中并未出现功能异常。样品 D 虽然可以完成功能性测试, 但是在防水防尘及盐雾试验后测距误差大幅上升, 误差波动较为明显, 分析其原因为水渍及沙尘污染了激光射出及接收透镜, 使其光斑分辨率下降, 进而导致测距误差增加。样品 E 误差离散程度较大, 但其环境可靠性试验后误差增幅不明显, 可能与其距离检测方式为脉冲法有关。

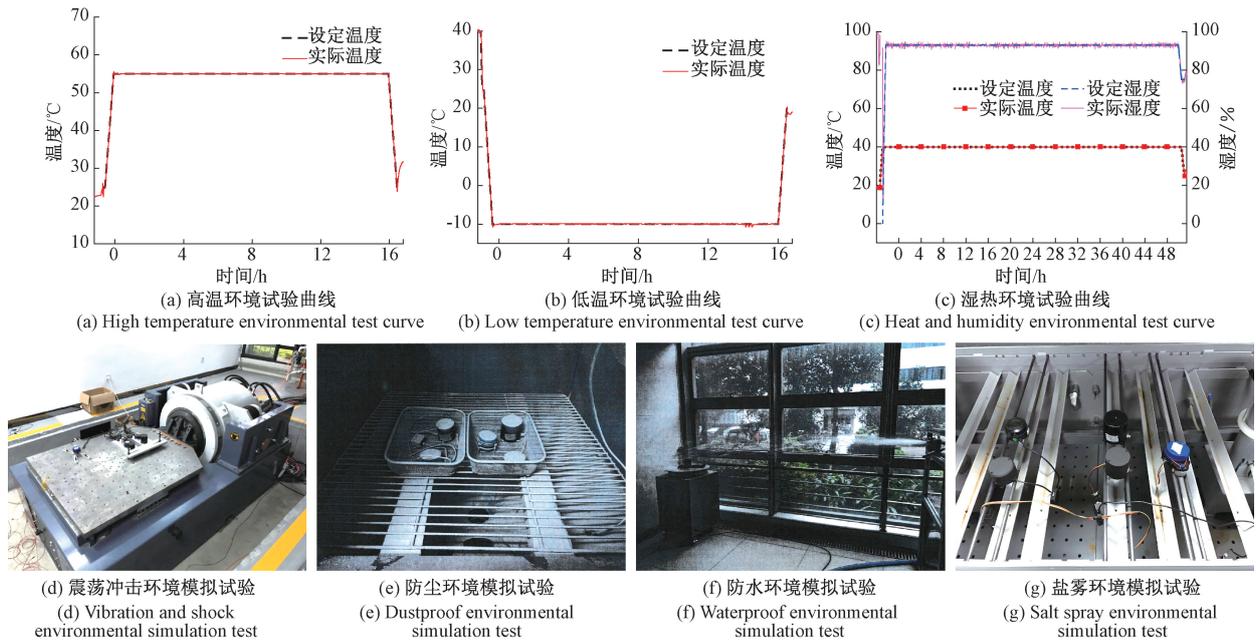


图3 激光测距组件环境参数及环境模拟试验

Fig. 3 Environmental parameter and environmental simulation test for laser ranging modules

表3 激光测距组件样品测距误差平均值及方差

Table 3 Average and variance of the ranging errors of laser ranging module samples

样品	测距精度	初始	高低温	湿热	震荡冲击	盐雾	防水防尘
A	平均值/mm	1.52	1.90	3.15	3.64	-	-
	方差	0.65	1.76	4.15	1.52	-	-
B	平均值/mm	2.12	4.48	4.70	5.70	5.78	-
	方差	1.62	8.72	5.76	11.09	8.51	-
C	平均值/mm	0.96	1.63	5.60	2.10	5.90	-
	方差	0.50	1.71	16.69	4.29	11.44	-
D	平均值/mm	7.48	7.90	8.20	10.50	22.00	22.60
	方差	10.88	15.01	7.40	9.81	155.56	194.64
E	平均值/mm	10.37	14.20	12.40	15.10	14.70	18.60
	方差	39.85	34.96	46.44	30.89	38.21	44.44

结合以上测距数据分析与讨论,各样品初始测距精度及环境可靠性试验测试后测距精度如图4所示,样品A、B和C表现出较为优越的测距精度,然而在防水防尘试验中均失效。在目标距离为200~1 000 mm范围内,环境可靠性试验对样品测距精度的影响较为显著,而随着测试距离的提升,样品测距精度逐渐提高并趋于稳定。样品E在200~600 mm范围内相较其他样品测距精度更差,可能与其测距原理为脉冲法有关。采用测距精度可靠性评价因子 R_s 对样品进行定量评价分析,2 000 mm测试范围内选取合格测距精度 δ_s 值为5%,极端工作条件下 λ_i 均为1,即模拟实际中样品全程在极端环境下工作。

根据式(2)计算可得,样品A、B、C、D和E的 R_s 值分别为20.15、10.30、10.24、0.92和1.20。分析结果表明,经过环境可靠性试验后,样品A、B和C的 R_s 值均大于10,表明其测距功能失效;样品D的 R_s 值 <1 ,表明其测距精度达到可靠性检测标准,样品E的 R_s 值介于1~10之间,表明样品测距失准。

针对服务机器人激光测距组件可靠性评价分为外观、功能性以及测距精度3个方面。其评判标准为:

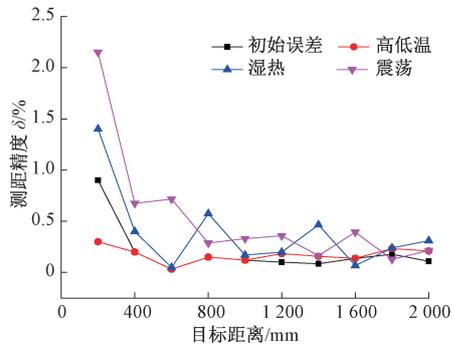
1) 外观

样品标识应清晰,样品表面无裂纹、起泡、起皱、变形和裂纹等现象为外观合格。

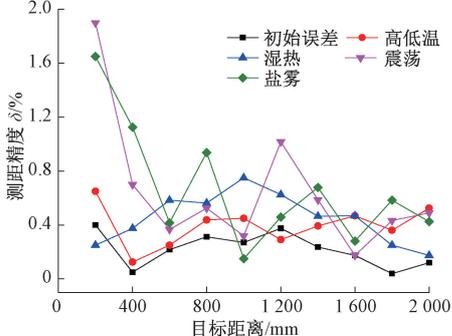
2) 功能性

样品可以进行距离检测,可以完成输入目标指令为功能性合格。

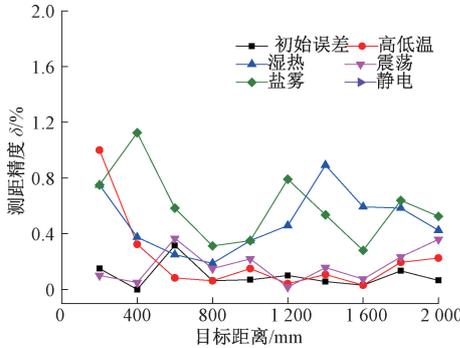
3) 测距精度



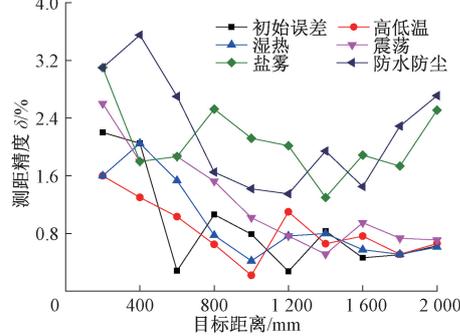
(a) Ranging accuracy variation diagram of sample A



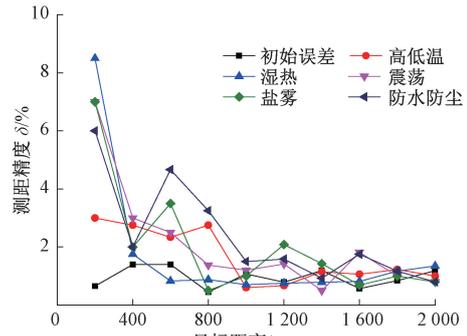
(b) Ranging accuracy variation diagram of sample B



(c) Ranging accuracy variation diagram of sample C



(d) Ranging accuracy variation diagram of sample D



(e) Ranging accuracy variation diagram of sample E

图 4 清洁服务机器人激光测距组件样品环境可靠性试验前后测距精度变化图

Fig. 4 Ranging accuracy variation diagrams of clearing service robot laser ranging module samples before and after environmental reliability tests

根据所提出测距精度可靠性函数进行定量评价, $R_s \leq 1$ 则该产品为合格产品。

结合图 4、表 3 试验结果对样品测距精度可靠性做出评价,如表 4 所示,所有样品初始外观、功能性检测以及测距精度检测合格,经过环境可靠性测试,样品外观符合检测标准,样品 A、B 和 C 在防水防尘试验中功能失效。环境可靠性试验对激光测距组件测距精度有较大影响,使其误差增大,其中防水防尘试验对测距精度影响较大,样品 E 在环境可靠性试验后测距失准,仅有样品 D 符合可靠性试验检测标准。由此可知,测距组件防水防尘能力较为薄弱,有待进一步完善,并且清洁服务机器人整机设计过程中应提升防水防尘能力,以预防测距组件发生故障。

表 4 样品可靠性评价结果

Table 4 Reliability evaluation results of the samples

样品	初始功能性检测	初始测距精度检测	可靠性测试后外观检测	可靠性测试后功能性检测	可靠性测试后测距精度检测	总体评价
A	合格	合格	合格	失效	失效	失效
B	合格	合格	合格	失效	失效	失效
C	合格	合格	合格	失效	失效	失效
D	合格	合格	合格	合格	合格	合格
E	合格	合格	合格	合格	失准	失准

3 结 论

本文以服务机器人激光测距组件可靠性定量评价为目的,建立激光测距组件环境可靠性评价模型,提出了激

光测距组件可靠性函数通用表达式,以测距精度为评价指标,提出了服务机器人激光测距组件可靠性评价函数以及检测方法,实现了不同类型的激光测距组件的环境可靠性的定量评价与比较。采用自主设计搭建的距离误差检测平台,模拟清洁服务机器人日常生活中工况和极端情况下可能存在的环境因素,设置不同严酷等级的环境模拟试验,对试验样品进行了测距精度的检测与分析,验证了所提出的环境可靠性检测模型与定量评价方法的可行性。研究发现服务机器人激光测距组件防水防尘性能较差,对高低温、湿热、震荡冲击及静电冲击有较好的防护性。根据可靠性试验检测结果,建议提升激光测距组件的密闭性,以避免其在水尘环境中发生损坏。本方法将为智能机器人的激光测距组件可靠性分析提供技术与改进途径。

此外,本文提出的环境可靠性分析评价模型及评价过程,也适用于其他行业用激光测距传感器的性能分析和提升,为提升激光测距传感器行业整体水平及市场竞争力提供了技术支撑。

参考文献

- [1] ASAFA T B, AFONJA T M, OLANIYAN E A, et al. Development of a vacuum cleaner robot [J]. Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(4): 2911-2920.
- [2] OZTEMEL E, GURSEV S. Literature review of industry 4.0 and related technologies [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 31(1): 127-182.
- [3] 穆卫谊, 张广鹏, 黄玉美, 等. 移动机器人的超声波传感器发散角标定及应用 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 560-567.
- MU W Y, ZHANG G P, HUANG Y M, et al. Calibration and application of ultrasonic sensor beam angle for mobile robots [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 560-567.
- [4] PIERZCHAŁA M, GIGUÈRE P, ASTRUP R. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D Lidar and graph-SLAM [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 217-225.
- [5] KIM P, CHEN J, CHO Y K. SLAM-driven robotic mapping and registration of 3D point clouds [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 38-48.
- [6] 王皓, 罗沛, 李小路. 近程动态范围激光雷达测距系统设计及误差分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(2): 422-429.
- WANG H, LUO P, LI X L. Design of lidar ranging system for short-distance dynamic range and error analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(2): 422-429.
- [7] CARMER D, PETERSON L. Laser radar in robotics [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 299-320.
- [8] XU X, ZHANG H, LUO M, et al. Research on target echo characteristics and ranging accuracy for laser radar [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96: 330-339.
- [9] BONACCORSO F, CATANIA F, MUSCATO G. Evaluation of algorithms for indoor mobile robot self-localization through laser range finders data [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(16): 563-568.
- [10] ZHAO Y H, SUPRI T B M, et al. A new static method of calibration for low-cost laser triangulation systems [J]. Measurement, 2020, 156: 107613.
- [11] HADDADIN S, DE LUCA A, ALBU-SCHAFFER A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(6): 1292-1312.
- [12] 方启万. 激光测距仪的可靠性估计 [J]. 激光技术, 1993(6): 357-361.
- FANG Q W. The reliability of laser rangefinders [J]. Laser Technology, 1993(6): 357-361.
- [13] 吴晗平. 某型激光测距系统可靠性预计 [J]. 应用光学, 2005(4): 30-32.
- WU H P. Reliability prediction for a certain type of laser range finder [J]. Journal of Applied Optics, 2005(4): 30-32.
- [14] 田宇, 高强, 李栋, 等. 测距传感器性能评估与故障诊断方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 172-178.
- TIAN Y, GAO Q, LI D, et al. Research on performance evaluation and fault diagnosis methods of distance sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 172-178.
- [15] MENTIN C, PRIEWALD R, BRENNER E. Accurate light source position estimation for a laser triangulation measurement device using particle swarm optimization [J]. Measurement, 2018, 125: 406-414.
- [16] 李现坤, 李泷泉, 李栋, 等. 激光雷达测量精度实验分析 [J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(3): 190-193.

- LI X K, LI SH G, LI D, et al. Experimental analysis of measurement error of laser radar [J]. *Machine Building & Automation*, 2018, 47(3): 190-193.
- [17] 孙国强, 田芳宁. 雷达可靠性设计与试验验证 [J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(3): 55-57.
- SUN G Q, TIAN F N. Radar reliability design and experimental verification [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(3): 55-57.
- [18] PHILLIPS T G, GUENTHER N, MCAREE P R. When the dust settles: The four behaviors of Lidar in the presence of fine airborne particulates [J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(5): 985-1009.
- [19] RYDE J, HILLIER N. Performance of laser and radar ranging devices in adverse environmental conditions [J]. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(9): 712-727.
- [20] FILGUEIRA A, GONZÁLEZ-JORGE H, LAGÜELA S, et al. Quantifying the influence of rain in Lidar performance [J]. *Measurement*, 2017, 95: 143-148.
- [21] GOLOVACHEV Y, ETINGER A, PINHASI G A, et al. Millimeter wave high resolution radar accuracy in fog conditions-theory and experimental verification [J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2148.
- [22] 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 1-10.
- ZHANG H J, MA J J, ZHANG J. Multi parameter error model and calibration of laser tracker [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 1-10.

作者简介



杨孟骐, 2017 年于北京工业大学获得学士学位, 2020 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士生, 主要研究方向为半导体材料光电性能、传感性能及应用。

Email: yangmengqi@emails.bjut.edu.cn

Yang Mengqi received his B. Sc. degree in 2017 and M. Sc. degree in 2020 both from Beijing University of Technology. Now, he is a Ph. D. candidate in Beijing University of Technology. His main research interest includes photoelectric and sensing performance, as well as application of semiconductor material.



王如志(通信作者), 1997 年于湘潭大学获得学士学位, 2000 年于湘潭大学获得硕士学位, 2003 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学材料与制造学部教授、博士生导师, 新能源材料与技术研究所所长, 主要研究方向为新型半导体功能材料与器件的设计、制备、应用及其性能评估等。

Email: wrz@bjut.edu.cn

Wang Ruizhi (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1997 and M. Sc. degree in 2000 both from Xiangtan University, received his Ph. D. degree in 2003 from Beijing University of Technology. Now, he is a professor and doctoral supervisor in Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, and the director of Institute of New Energy Materials and Technology. His main research interest includes design, preparation, application and performance evaluation of new semiconductor functional materials and devices.