

团 体 标 准

T/AIIA 001-2020

移动机器人定位导航性能评估规范 (征求意见稿)

目 次

前言.....	3
1 范围.....	4
2 规范性引用文件.....	4
3 术语和定义.....	4
4 定位与导航性能测试.....	8
5 避障能力.....	15
6 脱困性能.....	18
7 地图构建性能.....	19
8 多移动机器人协同能力.....	23
9 其它特殊性能测试.....	26
附录 A	28

2020-XX-XX 发布

2020-XX-XX 实施

2
深圳市人工智能产业协会 发布

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准由深圳市人工智能产业协会（Shenzhen Artificial Intelligence Industry Association）标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位：深圳市人工智能产业协会、深圳市大道智创科技有限公司、西安量子智能科技有限公司、深圳市标准技术研究院、北京云迹科技有限公司、深圳市优必选科技股份有限公司、深圳奥斯诺导航科技有限公司、西北工业大学、哈尔滨工业大学深圳研究生院、深圳优地科技有限公司、广州艾可机器人有限公司、深圳市智绘科技有限公司、深圳市普渡科技有限公司、深圳时空科技集团有限公司。

本标准主要起草人：李汉舟、朱晓蕊、邢志伟、龚汉越、范丛明，龙建睿、支涛、魏金生、应甫臣、魏伟、李睿、吕刚、袁杰、杨峰、王小旭、刘晓平、赵磊、孙文化。

本标准为首次发布。

移动机器人定位导航性能评估规范

1 范围

本规范规定了地面最大移动速度不大于3m/s的移动服务机器人导航、定位、避障评价指标体系和测试方法。

本标准适用的移动机器人包括讲解机器人、导购/导引机器人、物品递送机器人、移动广告机器人、巡逻机器人、大型洗地/清扫机器人等能够在地面低速行驶的轮式、履带式或足腿式机器人。其它类似机器人，可参考本规范对其导航定位性能进行评估。本规范不包括在没有道路的情况下（山区、沙漠、树林、野地）使用的特种作业机器人，不包括家庭扫地、吸尘、拖地等小型机器人，也不包括在公路上人车混杂环境应用的无人移动设备。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12643—2013 机器人与机器人装备 词汇

GB/T 38124-2019 服务机器人性能测试方法

ISO 18646-1-2016 机器人 服务机器人性能规范机器人试验方法 第1部分：轮式机器人运动 (Robotics-Performance criteria and related test methods for service robots – Part 1: Locomotion for wheeled robots)

3 术语和定义

3.1 机器人本体和操作

3.1.1

移动平台

能使移动机器人实现运动的全部组装件，包含用于支持负载的结构和移动机械机构。

3.1.2

正常工作状态

机器人制造商规定的，在符合使用环境下能正常运行的状态。

3.1.3

自动导航模式

机器人控制系统按照轨迹规划任务程序自主行走的一种工作方式。

3.1.4

手动模式

通过按钮、操作杆以及除自动操作外，对机器人进行操作的控制方式。

3.1.5

待机状态

机器人处于正常上电，但不做任何操作的状态。

3.1.6

开机时间

主电源打开以后，机器人各系统完成上电启动和自检工作，进入待机状态的时间。

3.1.7

待机功耗

机器人在待机状态下，单位时间内所消耗的电量。

3.1.8

工作能耗

机器人在工作状态下，单位时间内所消耗的电量。

3.2 传感器

3.2.1

激光雷达

通过主动发射并接收反射回来的激光，实时测量目标的位置、速度、距离，形成点云图像，可用于环境感知的传感器。

3.2.2

主动结构光视觉

将结构化（点结构、线结构、面结构或光学编码）的光线投射到物体表面，获取视觉图像后，通过计算图像中结构光的变形（或飞行时间等）来确定被测物体的三维尺寸和位置信息，可用于环境感知的传感器。

3.2.3

里程计

用于测量行驶距离的传感器。

3.2.4

惯性导航

采用陀螺和加速度计，测量载体的角速度和加速度，并通过导航解算得到载体运动的速度、姿态和位置信息，是一种不依赖于任何外部信息的导航技术。

3.2.5

主传感器

在多传感器融合系统中，发挥最主要作用的传感器。

3.2.6

主传感器作用距离

机器人导航系统中，主传感器的最大探测距离。

3.3 机器人导航、定位及避障

3.3.1

轨迹规划

设定机器人运动的时间位置序列信息。

3.3.2

位姿

表达机器人空间位置和姿态的六维向量，包含三个位置和三个姿态角信息。对于在平面场地工作的机器人，位姿可以简化为二维平面坐标和机器人航向角的组合，形成一个三维向量。

3.3.3

定位

在环境地图上识别或分辨出移动机器人的位姿。

3.3.4

导航

根据指令或设定程序，控制机器人从起始定位点通过特定路径达到目标定位点。

3.3.5

避障

机器人在行进过程中，中断原有轨迹规划，主动躲避障碍物，完成躲避后，继续按照原轨迹规划运动。

3.3.6

重定位

当前位姿丢失以后，重新获取新的位姿的过程。

3.3.7

半围观

机器人周边大部分区域被人群或障碍物占据，只剩下唯一的通道能够行走。

3.3.8

脱困

机器人行进轨迹被复杂障碍物阻挡，不能进行有效避障和行走，在恢复通道或具有通道后，重新获得正常移动能力的过程。

3.3.9

协同避让

多个移动机器人相遇时，自动调整位姿，彼此躲避。

3.3.10

最小通过宽度

机器人能够自主通过的最窄通道的宽度。

3.3.11

续航能力

机器人充满电后，连续行驶的最大距离或工作的最长时间。

3.4 机器人建图

3.4.1

环境地图

由一定分辨率的环境感知传感器和相关算法建立的环境数学模型，用于表达环境特征。

3.4.2

建图

建立环境地图的过程。

3.4.3

增量建图

在已有环境地图基础上，进一步增加或修改部分内容，形成新的环境地图。

3.4.4

修正建图

在已有环境地图基础上,对原有环境地图中区域视觉特征变化剧烈的部分,进行修改补充的建图方法。

3.4.5

扩展建图

针对某些应用环境不能一次完成建图,或不适合一次构建完整地图的场景,分次逐步添加新区域地图至原有环境地图的建图方法。

3.4.6

地图共享

一个机器人的建图结果可以被其它机器人使用。

3.4.7

回环检测

判断机器人是否回到出发点,利用闭环约束消除机器人行走累计定位误差的方法。

4 定位与导航性能测试

4.1 定位与导航性能测试设备及通用测试环境布置

4.1.1 测试设备

机器人定位和导航过程中,测试设备应具备对机器人姿态和路径追踪功能,并能实时完成位置、角度、运行轨迹、移动速度、旋转速度等参数的记录和计算。在室外测试时,可以采用双天线 GPS/Bd 定位定向系统,高精度惯性导航系统,视觉追踪系统、激光追踪仪等,本规范对测试设备类型不做强制规定,但所用测试设备应带有计量鉴定部门出具的计量鉴定合格证,并在有效期内。

测试设备要求如下:

- 位置分辨率 $\leq 3\text{cm}$;
- 位置精度 $\leq 5\text{cm}$;
- 角度分辨率 $\leq 3^\circ$;
- 角度精度 $\leq 5^\circ$;
- 数据采集频率 $\geq 30\text{Hz}$ 。

4.1.2 通用测试环境

测试环境温湿度为机器人标称使用的典型环境温湿度。对于主要应用于室内的机器人,优先选择在室内测试;对于主要应用于室外的机器人,优先选择在室外测试。当测试场地不能达到测试目标和精度时,可以灵活选择室内或室外测试。室外测试应选择无雨雪、大风等恶劣天气。要求测试区域应开阔,在测试路径上以及测试路径附近不能有非设定障碍物。

若测试区域设置有隔离墙,则需满足机器人在设定测试路径上任何一个位置时,隔离墙与机器人中心的距离不小于 $1.5L$ (L 为机器人沿运动方向的长度)或不小于 1.5m ,二者取较小值。隔离墙高度应当高于机器人高度,并且不能被越过。

场地面积则需根据机器人大小和转弯半径确定。可以选择室内或室外篮球场作为测试场地，面积为 200-1000m²。有些试验如果无法找到合适场地或不方便在空旷场地进行，也可以根据试验环境具体要求选择其它场地。

4.1.3 通用测试路径

测试路径包括：

——直线形路径：在测试区域设定起点 A 和目标点 B，AB 距离至少 5L（L 为机器人沿运动方向的长度），机器人行走方向要求如图 1 所示。

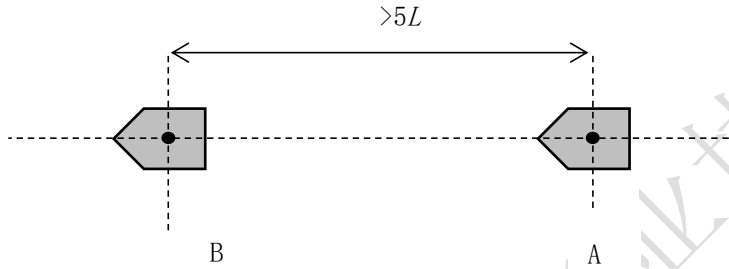


图 1

——L 形路径：在测试区域设定起点 A 和目标点 B，机器人行走方向要求如图 2 所示，L 为机器人沿运动方向的长度。

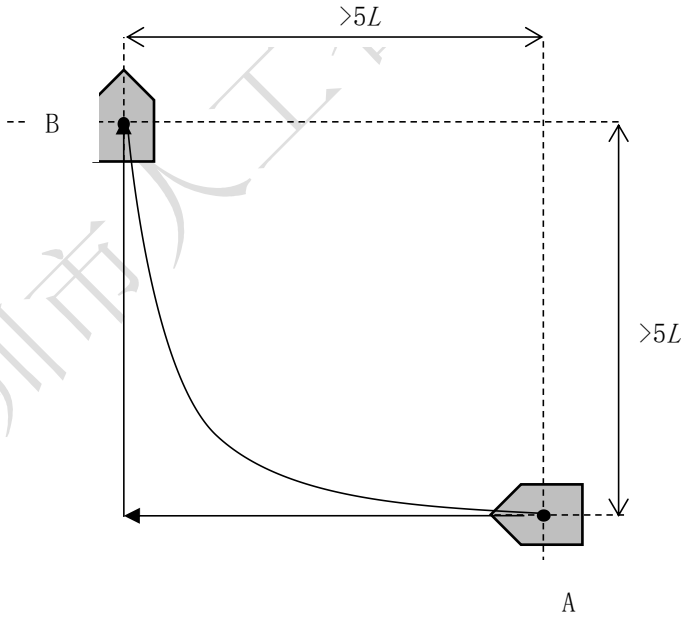


图 2

——U 形路径：在测试区域设定位置点 A、B、C、D，机器人行走方向要求如图 3 所示，L 为机器人沿运动方向的长度。

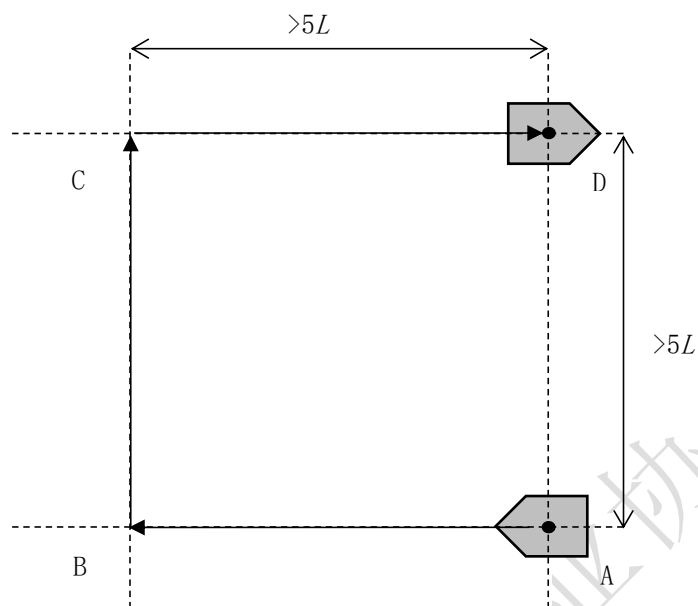


图 3

——回形路径：在测试区域设定位置点 A、B、C、D，机器人行走方向要求如图所示 4，机器人按 A-B-C-D-A 路径行走，此路径起点和目标点均为 A，L 为机器人沿运动方向的长度。

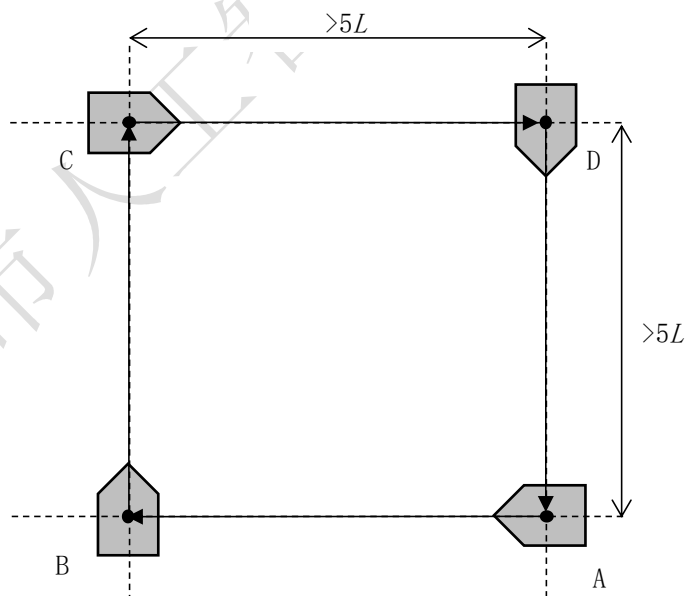


图 4

4.1.4 通用测试速度约定

本规范中，凡没有明确约定机器人行进速度的测试项目，机器人行进速度均为厂家标称的额定速度 $V_{\text{额定}}$ 。

4.1.5 其它通用测试设备

有质量鉴定合格标签的秒表或计时器，精度 1s。

4.2 定位性能

4.2.1 测试目的

本指标为了评估机器人在自主导航模式下，沿不同测试路径到达指定目标的能力，包括到达目标点的位姿准确度与重复性。

4.2.2 测试环境与设备

使用 4.1.1 测试设备， 4.1.2 测试环境， 4.1.3 测试路径。

4.2.3 测试方法

选择 4.1.3 中每一种测试路径类型，设定机器人起始点和目标点，在自主导航模式下使机器人从起始点到达目标点，记录机器人到达目标点时的实际位姿 (x_i, y_i, θ_i) ，记设定的目标点位姿为 (x_0, y_0, θ_0) ，每种路径重复测试 N (N=6~10) 次。记平均位姿信息为： $(\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ，

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i)。$$

$$\text{位置准确度: } AP_l = \sqrt{(\bar{x} - x_0)^2 + (\bar{y} - y_0)^2} \quad (4-1)$$

$$\text{姿态准确度: } AP_\theta = \bar{\theta} - \theta_0 \quad (4-2)$$

$$\text{位置重复性: } RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (4-3)$$

其中：

$$\bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \quad (4-4)$$

$$l_i = \sqrt{(\bar{x} - x_i)^2 + (\bar{y} - y_i)^2} \quad (4-5)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{l} - l_i)^2} \quad (4-6)$$

$$\text{姿态重复性: } RP_\theta = 3S_\theta, S_\theta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{\theta} - \theta_i)^2} \quad (4-7)$$

4.2.4 测试结果

测试完成后，填写测试结果，被测机器人最终评测结果为所测试所有路径条件下的平均值，如表 1 所示：

表 1 定位性能测试结果

序号	路线类型	位置准确度 $AP_l(\text{m})$	姿态准确度 $AP_\theta(^{\circ})$	位置重复性 $RP_l(\text{m})$	姿态重复性 $RP_\theta(^{\circ})$	备注
1						

2						
3						
4						
均值						

4.3 重定位性能

4.3.1 测试目的

本指标为了评估机器人在开机启动后，确定自己位姿的能力和速度，以及在某些场景环境中丢失自己位姿信息后，重新确定位姿的能力，包括重定位成功率、速度、准确度和重复性。

4.3.2 测试环境与设备

使用 4.1.1 测试设备，4.1.2 测试环境，4.1.3 中 L 形或 U 形测试路径。

4.3.3 测试方法

选择 L 形或 U 形测试路径，在机器人航向角转过 90° 以后的路径上选择一个测试点。

机器人进入自主导航模式，并运行到该测试点后，命令机器人停止运动，记录此时测试设备上输出的机器人位姿 (x_0, y_0, θ_0) 。然后遮挡其主传感器，使其位姿信息丢失 10s 以上，撤除遮挡物，记录从撤除遮挡物开始，在 30s 内是否能够重定位成功及重定位时间。若重定位成功，机器人导航定位系统输出的重定位位姿为 (x_i, y_i, θ_i) ，每个测试点重复 N ($N=6\sim 10$) 次，测试点不少于 3 个（起点、终点、一个中间点）。

重定位过程允许机器人在原地作小幅度的运动，小幅度运动中机器人中心与测试点偏离距离不得超过 $0.5L$ (L 为机器人沿运动方向的长度)，否则按重定位失败处理。对机器人原地运动航向角大小不作限制。若机器人是经过小幅度运动后重定位成功，则重定位成功后，记录此时测试设备上输出的机器人位姿 (x_0, y_0, θ_0) ，机器人导航定位系统输出的重定位位姿为 (x_i, y_i, θ_i) 。

定义如下指标：

- 成功率 (P_{rel})：30s 内成功重定位的概率
- 重定位时间 (T_{rel})：成功重定位的情况下，重定位消耗的平均时间
- 重定位位置准确度 (ARP_l)：根据公式 (4-1) 计算
- 重定位姿态准确度 (ARP_θ)：根据公式 (4-2) 计算
- 重定位位置重复性 (RRP_l)：根据公式 (4-3) 计算
- 重定位姿态重复性 (RRP_θ)：根据公式 (4-7) 计算
- 开机重定位：在 4.3.3 中，选择一个起始点，将机器人放置在该点处之后再开机，重复 N (6-10) 次，使机器人在全局地图中进行重定位。其它同上。

4.3.4 测试结果

测试完成后，填写重定位指标测试结果，见表 2：

表 2 重定位指标测试结果

序号	重定位测试项目	重定位成功率 P_{rel}	重定位时间 $T_{rel}(s)$	位置准确度 $ARP_l(m)$	姿态准确度 $ARP_\theta(^{\circ})$	位置重复性 $RRP_l(m)$	姿态重复性 $RRP_\theta(^{\circ})$	备注
1	特定路径							
2	开机							

4.4 导航性能

4.4.1 测试目的

测试机器人在工作环境下的路径规划能力和运动轨迹控制能力。

4.4.2 测试环境与设备

使用 4.1.1 测试设备，4.1.2 测试环境，4.1.3 中直线形测试路径或本节定义的”S”形特殊路径。

4.4.3 测试方法

4.4.3.1 导航路程误差

在 4.1.3 测试环境中，选择直线形测试路径，指定起点 A 和目标点 B，使机器人在自主导航模式下从 A 到达 B，测试设备记录机器人的行走路程 L_i ，记 L_0 为 A-B 最短路程，路程差为 $L_i - L_0$ ，重复 $N(6-10)$ 次，计算得到均方根误差：

$$E_L = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_i - L_0)^2} \quad (4-8)$$

及单位路程均方根误差：

$$\overline{E}_L = \frac{E_L}{L_0} \quad (4-9)$$

4.4.3.2 导航时间误差

测试过程同 4.4.3.1，记录数据为行走时间 T_i ， T_0 为机器人以额定速度走完 A-B 最短路程所需要的时间，时间差为 $T_i - T_0$ ，重复 $N(6-10)$ 次，计算得到均方根误差：

$$E_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_0)^2} \quad (4-10)$$

及单位时间均方根误差：

$$\overline{E}_T = \frac{E_T}{T_0} \quad (4-11)$$

4.4.3.3 单位轨迹均方根误差（选做项目）

对于有设定路径功能的机器人，此项测试机器人导航的控制能力。在图 5 中，由两个半径为 $R(R \geq 5L)$ 的半圆拼成”S”形测试路径，令机器人在该设定路径 L_0 上行走，测试设备记录机器人实际行走轨迹为 L_i ，重复 $N(N \geq 3)$ 次。对 L_0 和 L_i 等距采样获取同等数量的 $K(K \geq 10)$ 个位置采样点：

$$LP_0 = \{(x_0^1, y_0^1), (x_0^2, y_0^2), \dots (x_0^K, y_0^K)\}$$

$$LP_i = \{(x_i^1, y_i^1), (x_i^2, y_i^2), \dots (x_i^K, y_i^K)\}$$

轨迹均方根误差：
$$E_{traj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{traj,i} \quad (4-12)$$

$$E_{traj,i} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [(x_i^k - x_0^k)^2 + (y_i^k - y_0^k)^2]} \quad (4-13)$$

单位轨迹均方根误差：
$$\overline{E_{traj}} = \frac{E_{traj}}{L_0}, \quad (L_0 \text{ 为指定轨迹长度}) \quad (4-14)$$

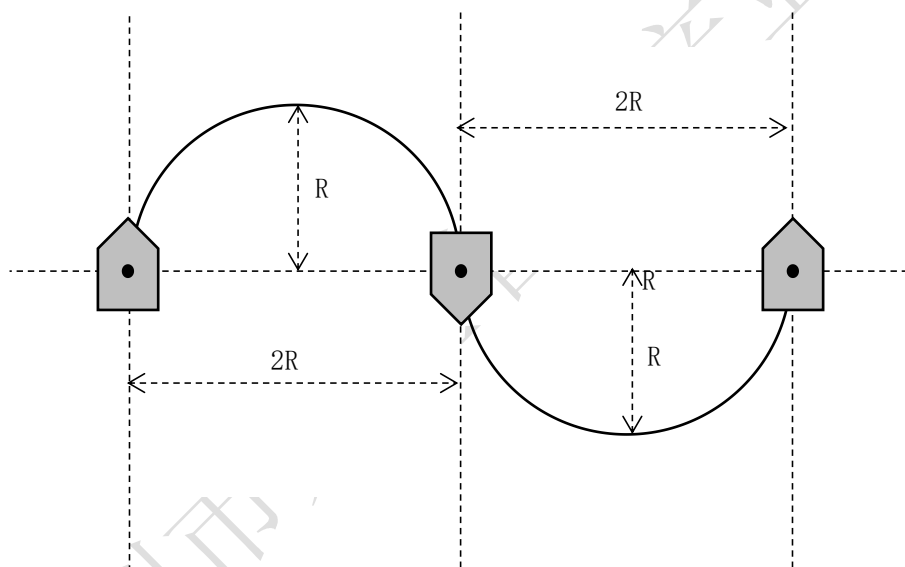


图 5： S 形路径

4.4.3.4 行走平滑度（选做项目）

定义：上一时刻位姿与下一时刻位姿之差大于 3° 为一次巨大位姿调整；上一时刻速度与下一时刻速度之差大于机器人额定速度的 15%，记为一次巨大速度调整。时刻间隔定义为 0.5s。

选择 4.4.3.3 测试路径，记路径长度为 L 。设定被测机器人行驶速度为额定速度，控制被测机器人以自主导航模式从“S”形路径起点行进到终点，记录行进过程中机器人巨大位姿调整和巨大速度调整的总次数 n 。

行走平滑度：
$$S_m = \frac{n}{L} \quad (4-14)$$

4.4.4 测试结果

测试完成后，填写测试结果，见表 3：

表 3 导航性能指标测试结果

导航路程误差	导航时间误差	单位轨迹均方根误差	行走平滑度 S_m	备注
$\overline{E_L}$ (m/m)	$\overline{E_T}$ (s/m)	$\overline{E_{traj}}$ (m/m)	(次/m)	

5 避障能力

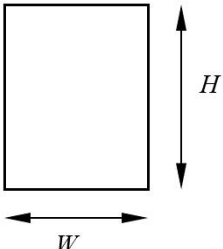
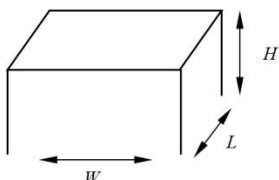
5.1 测试目的

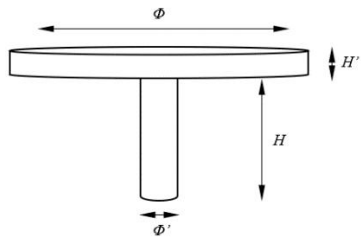
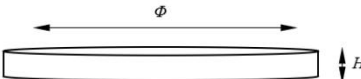
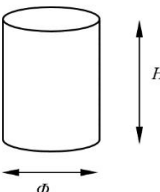
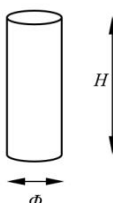
本测试是在机器人正常工作条件下，测试其在不同工作环境中对静态和动态障碍物识别和避让的能力。

5.2 测试环境与设备

本节试验环境为4.1.2定义的通用测试环境。试验设备为不同形状和材质的障碍物，典型障碍物规格见表4。相同形状，但材质不同的障碍物视为不同障碍物。本规范涉及的障碍物形状有5种、材质有5 种，定义的障碍物共有10 种。

表 4 典型障碍物

名称	几何形状	描述
墙面		平板，材质范围包括：1、镜面；2、玻璃；3、木材；4、铝合金；5、厚度大于 1mm 的帘布。 高 H:1500mm 宽 W:1000mm
桌子		带有四条支柱的桌子，材质为木材。 高 H： 700mm~800mm 宽 W： 500mm~800mm 长 L： 300mm~600mm 桌子腿宽度： 小于 50mm×50mm

空中圆盘		空中圆盘，材质为木材。 高 H:600mm 高 H' :20mm 直径 Φ :500mm 直径 Φ' :100mm
低矮圆盘		低矮扁形圆柱体，材质为木材。 高 H:80mm 直径 Φ :300mm
大圆柱		大圆柱体，模拟人的躯干，材质为木材。 高 H:600mm 直径 Φ :200mm
小圆柱		小圆柱体，模拟人的手臂或腿等，材质为木材。 高 H:400mm 直径 Φ :70mm

5.3 测试方法

5.3.1 静态障碍物避让测试

5.3.1.1 机器人最小通过宽度测试

如图6所示，机器人进入自主导航模式，设定导航路径通过障碍物S01和S02，逐步减小S01和S02间距。若测试机器人能顺利往返P1和P2点，且不触碰到障碍物连续30次，则将此距离定义为机器人的最小通过宽度 W_{pass} 。S01和S02是5-2节描述的5种墙体障碍物中的一种，且为同一种障碍物。

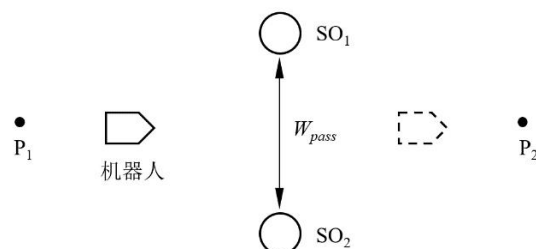


图 6 最小通道宽度试验图

5.3.1.2 静态避障能力及效率测试

a) 测试方法:

根据场地大小确定一次试验能够容纳的障碍物 SO_n ($n \leq 10$) 数量 (SO_n 为 5.2 节描述的 10 种障碍物中的一种), 每一种障碍物在本试验中只出现一次。障碍物布局如图 7 所示。障碍物选择的数量和材质越多, 表明机器人避障适应性越强。5-2 图中粗实线部分代表真实墙体或 5.2 节描述的墙体障碍物, 最窄墙体通道宽度为机器人最小通过宽度 W_{pass} 的 1.1 倍。P1 和 P2 点是起始点或目标点。且 P1 和 P2 点的连线经过每对障碍物连线的中心。每两对相邻障碍物 SO_n 和 SO_{n+1} 间的距离大于机器人沿运动方向长度 L 的 5 倍。令机器人从 P1 点自主行进到 P2 点。若机器人成功抵达, 且未碰触到障碍物, 记为成功避障 1 次。

如果测试场地足够大, 可以一次摆放 5.2 节描述的 10 种障碍物。记录 N ($N=6 \sim 10$) 次试验过程中, 机器人成功避障的次数和材质数量, 以及每次从起点到终点的行驶时间 t_i 。

如果受场地大小限制, 一次不能摆放多个障碍物时, 可分组试验。每一组障碍物测试 N ($N=6 \sim 10$) 次。累计待测机器人在每一组试验中成功避障的次数和材质数量, 以及每次从起点到终点的行驶时间 t_i 。

试验中, 如果机器人不能正确避让某一种障碍物, 导致后续测试无法继续进行, 则可更换障碍物 (更换的障碍物必须从 5.2 节描述的 10 种障碍物中选择) 或取消该障碍物重新试验。被更换或取消的障碍物不参与累计计数。

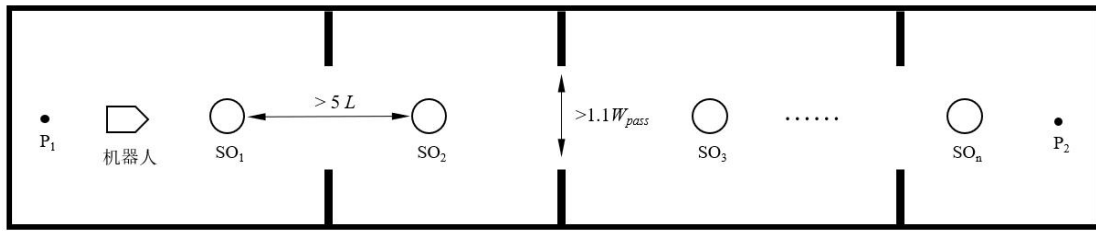


图 7 机器人静态避障能力试验图

b) 结果计算:

假设试验分为 k 组进行 (如果一次能够摆放 10 个障碍物, 则不用分组, 即 $k=1$), 每组试验 N ($N=6 \sim 10$) 次, 每组试验障碍物数量为 n ($n \leq 10$)。成功避让的障碍物总数量为 s , 成功避让的障碍物种类总数为 p , 成功避让的障碍物材质种类为 m 。定义静态避障能力 $SOA(p, m)$, 静态避障速度效率为 $E_{as}(p, m)$, 计算方法如下:

$$SOA(p, m) = s / (k \times N \times n) \times 100\% \quad (5-1)$$

$$E_{as}(p, m) = \frac{L_{p1p2}}{\sum_{i=1}^{N \times k} t_i} / v_{\text{额定}} \times 100\% \quad (5-2)$$

其中: L_{p1p2} 为 $p1$ 和 $p2$ 之间距离;

$v_{\text{额定}}$ 是机器人额定速度;

t_i 是机器人第 i 次从起点到终点的行驶时间。

5.3.2 动态障碍物避让能力和效率

5.3.2.1 测试方法:

如图 8 所示，在一个宽度范围是 4-6 倍 W_{pass} 的狭长通道内，设置两组移动障碍物 SO_1 和 SO_2 ，设定机器人的行进轨迹为在 P_1 和 P_2 两点之间往返行驶。记录机器人在行进过程中没有碰到两组移动障碍物的次数。在连续 N ($N=3$) 次成功测试后，视为测试成功。 SO_1 和 SO_2 是放置在可以移动的平台上的大圆柱障碍物（5.2 节定义），或者是来回走动的试验人员。障碍物 SO_1 按图 5-3 所示的左右走向往复运动，障碍物 SO_2 按上下走向往复运动。测试场景参数约定：

- 1) 狭长通道宽度：4-6 倍 W_{pass} ， W_{pass} 为机器人最小通过宽度；
- 2) 障碍物 SO_1 和 SO_2 移动速度设定为：机器人额定速度的 80%；
- 3) 障碍物移动距离： $L_d = 3W_{pass}$ ；
- 4) 障碍物 SO_1 和 SO_2 距离： $\geq 5L$ ，（机器人沿运动方向长度 L 的 5 倍）；
- 5) P_1 和 P_2 点距离： $L_{p1p2} \geq 12L$ ，（机器人沿运动方向长度 L 的 5 倍）。

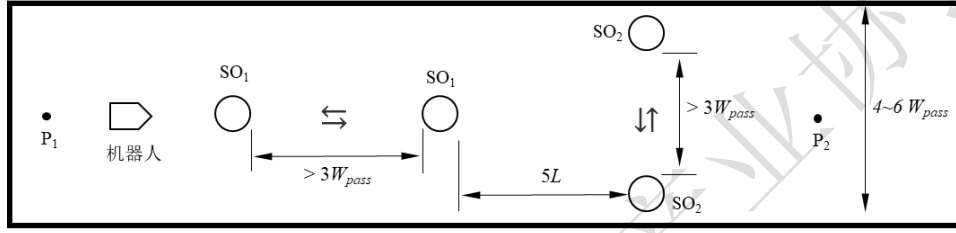


图 8 机器人动态避障能力试验图

5.3.2.2 结果计算：

如机器人未到达目标位置 P_2 或在运动过程中碰到障碍物，则视为测试失败。在连续 N ($N=3$) 次成功测试后，视为测试成功。定义机器人避让动态障碍物的运行速度为 V_{bd} ，实测机器人从 P_1 到 P_2 点的时间为 t_i ，则：动态避障速度可记为：

$$V_{bd} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_{p1p2}}{t_i} \quad (5-3)$$

对于 N 次试验，平均动态避障速度效率可记为：

$$E_d = V_{bd} / V_{\text{额定}} \times 100\% \quad (5-4)$$

其中： $V_{\text{额定}}$ 是机器人额定速度。

6 脱困性能

6.1 测试目的

考察机器人在复杂场景或受限空间中的自主逃离困境的能力。

6.2 测试环境与设备

在 4.1.2 通用测试环境中，用 5.2 节中木质墙面构成凹形障碍物（或用试验人员组成凹形障碍物），将机器人半包围，如图 6-1 所示。要求凹形障碍物内部空间足够大，可以保证机器人完成掉头动作。凹形障碍物口处宽度尺寸为 W ($W_{pass} \leq W \leq W_{pass} + 20\text{cm}$ ， W_{pass} 为机器人最小通过宽度)。机器人以 P_1 为出发点，且机器人的朝向（正常前进方向）为背向出口， P_2 为目的地， P_1 和目标点 P_2 之间距离 $L_{p1p2} \geq 5L$ (L 为机器人沿运动方向的长度)。

6.3 测试方法

测试方法如下：

- 如图 9 所示，将机器人按规定方向置于 P1 点；
- 进入自动驾驶模式，设置行进路线为凹形障碍物正前方 P2 处；
- 记录机器人成功从 P1 点抵达 P2 的时间和次数。如果 30s 内无法行走到达目标点，则记录为失败一次。
- 如果脱困成功，记录第 i 次测试中机器人到达目标点所需的时间 t_i 。
- 重复试验 N ($N \geq 20$) 次。

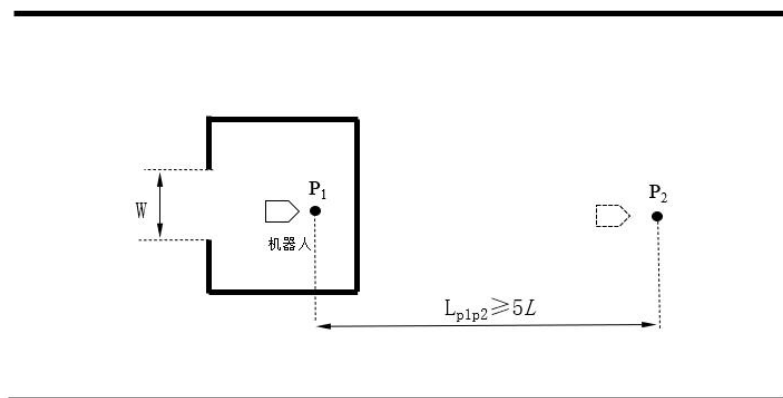


图 9 机器人脱困能力试验示意图

6.4 脱困能力计算

试验共进行 N ($N \geq 20$) 次，成功脱困次数记为 n，定义脱困概率 P_b ，脱困速度效率为 E_t ，计算方法如下：

脱困概率 P_b

$$P_b = n/N \times 100\% \quad (6-1)$$

脱困平均速度效率 E_t ：

$$E_t = \frac{L_{p1p2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} / v_{\text{额定}} \times 100\% \quad (6-2)$$

7 地图构建性能

7.1 建图精度测试

7.1.1 测试目的

机器人在自主导航之前，一般需要建立环境地图，环境地图的分辨率和准确性，直接影响机器人导航和避障性能。本节内容就是为了评价机器人建图后获得的环境地图精度。

7.1.2 测试环境与设备

在 4.1.2 节定义的通用测试环境中，均匀布设 k ($k=10 \sim 15$) 个标志杆。标志杆上应包含足够明显的特征，能够被主传感器准确识别。在测试场地最大长度和最大宽度方向应至少

布设各一对标志杆。所有标志杆之间相对平面直线距离已知（或通过皮尺或其它方法提前测量得到）。设各标志杆之间实际间距为 $L_{0ij}(i,j = 1,2...k)$ 。

7.1.3 测试方法

- 测试步骤如下：
- a) 使用机器人系统对测试场景进行建图，行走路线不固定，但应经过所有标志杆，确保在图中能够找到所有标志杆的相对坐标。如图 10 所示；

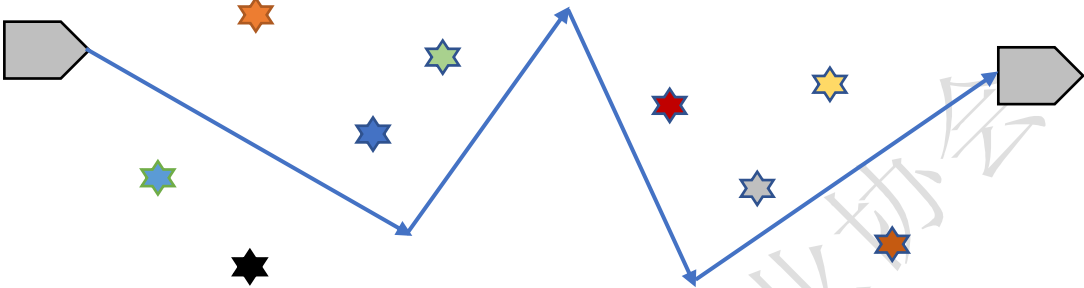


图 10：一种可能的机器人构建地图行走路线

建图完毕后，在所建地图中分别找到标志杆所对应地图坐标点。在同一幅地图中分别计算所有标志杆两两之间距离，记为 $L_{Rij}(i,j = 1,2...k)$ ，如图 7-2 所示，图中白色星为环境地图中标志杆位置，彩色星为测试场景中标志杆的实际位置；

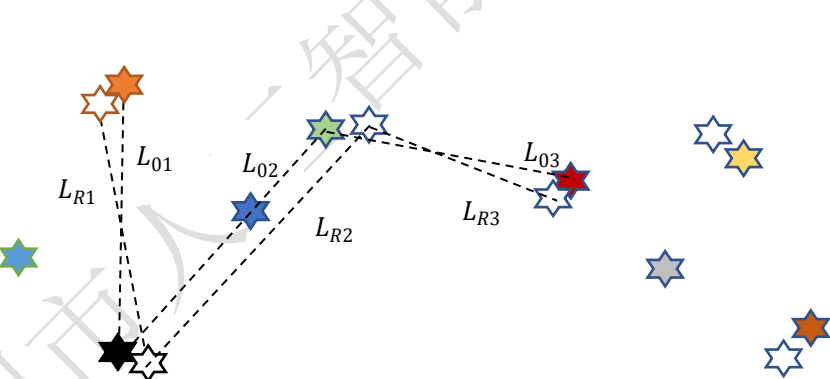


图 11：环境地图和真实场景中标志杆距离关系

- b) 重复步骤 a) 和 b) $N(N=3\sim 6)$ 次；

7.1.4 计算方法

按照公式表 5 分别计算每次建立的环境地图中，每一个标志杆和其它 $k-1$ 个标志杆之间的直线距离 i 的误差 DE_{ij} ：

$$DE_{ij} = L_{Rij} - L_{0ij} \qquad i = 1,2...k$$

表 5：标志杆之间距离误差统计表（单位：m，假设 $k=10$ ）

序号	1	2	3	...	9	10
1	0	$DE_{1,2}$	$DE_{1,3}$		$DE_{1,9}$	$DE_{1,10}$

2	$DE_{2,1}$	0				
3	$DE_{3,1}$		0			
...				0		
10	$DE_{10,1}$				0	
$ DE_{i,max} $						0

以每一个标志杆与其它标志杆距离的最大绝对值误差 $|DE_{i,max}|$ 为该标志杆距离误差（表 7-1 按列取绝对值的最大值）。

定义一次建图误差为：在一次建立环境地图操作中，每一个标志杆距离误差的均值：

$$|\overline{DE_{max}}| = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |DE_{i,max}| \quad (7-1)$$

定义建图精度 DE 为 N 次建图误差的均值：

$$DE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\overline{DE_{max}}|_i \quad (7-2)$$

7.2 单位面积建图时间

7.2.1 测试目的

测试使用视觉传感器（如相机、激光雷达等设备）进行定位或辅助定位的移动机器人系统构建环境地图的速度。

7.2.2 测试环境与设备

在 4.1.2 定义的测试环境中，均匀分布机器人主传感器可以识别的 N 个典型障碍物（表 5-1 定义）或类似障碍物，障碍物密度为每 20m² 一个。

采用秒表或计时器计时（也可通过机器人系统服务器日志中的时间戳来确定时间）。

7.2.3 测试方法

测试步骤如下：

- 机器人系统在测试环境中进行建图，建图过程中需经过测试环境中设置的 N 个障碍物，在输出的环境地图应包含对应的障碍物；
- 记录建图过程中数据采集时间 T_c （从机器人开始行走到最后停止的过程所消耗的时间）、数据传输时间 T_t （如果采用服务器进行建图，则统计从机器人采集某帧数据到服务器获取该帧数据所消耗的时间；如果采用本地建图则此项时间为零）、数据处理及数据存储的时间 T_p （从机器人运动停止到完成场景地图本地生成，以及人工编辑地图所消耗的时间）；则总建图时间为： $T_e = T_c + T_t + T_p$ 。
- 在同一环境条件下重复建图 N ($N=3\sim 6$) 次；

7.2.4 计算方法

在该测试环境下， N 次试验的平均建图时间 $\overline{T_e}$ ：

$$\overline{T_e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{ei} \quad (7-3)$$

定义单位面积建图时间 RT_i (单位: s/m^2) :

$$RT_i = \overline{T_e}/S \tag{7-4}$$

其中: S 为测量场地面积。

7.3 增量建图能力

7.3.1 测试目的

测试使用视觉传感器（如相机、激光雷达等设备）进行定位或辅助定位的移动机器人系统是否具备增量构建地图的能力（可以是栅格地图、特征点地图、稠密像素点地图）。增量构建地图能力包含对原有地图区域视觉特征变化进行修正的能力（即修正建图）和添加新区域至原有地图的能力（即扩展建图）。

7.3.2 测试环境与设备

在 4.1.2 定义的测试环境中，用表 5-1 定义的木质墙体作为隔板划分成不同区域，每个区域内部具有若干个典型障碍物（表 5-1 定义的典型障碍物）或类似障碍物，障碍物密度为每 20m² 一个。区域划分所使用隔板及典型障碍物可以随时拆卸。

以上场地也可以采用室内（外）环境和其它障碍物搭建。

7.3.3 测试方法

7.3.3.1 修正建图

测试步骤如下：

- a) 机器人系统在测试环境中进行建图，建图过程中需经过设置的若干个障碍物，在输出的环境地图应包含对应的障碍物，如图 12 所示；

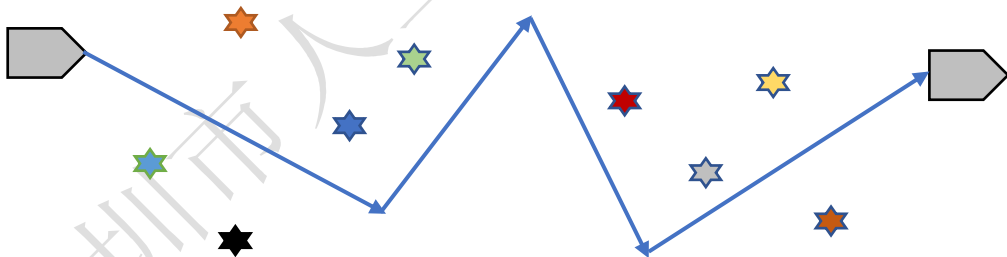


图 12：机器人对测试场景进行建图

- b) 建图完毕后随机选择测试区域内一半原有典型障碍物，将其移至与区域内随机其它位置，并保证新位置与初始位置距离 1m 以上。或添加（减少）10%的典型障碍物。
- c) 重新操作机器人系统，设置其初始地图为第一步输出的环境地图，在新的测试环境中进行修正建图操作，如图 13 所示；

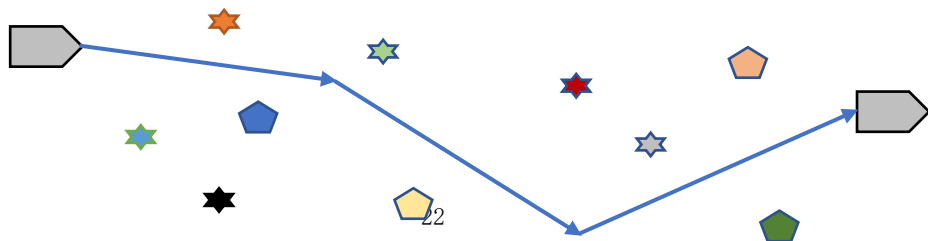


图 13 修正建图

- d) 修正建图完毕后，观察初始地图与更新之后地图的变化情况，应能如实删除被移除的障碍物，并将其重新构建到新的位置。或者增加（删减）相应障碍物。

7.3.3.2 扩展建图

测试步骤如下：

- a) 机器人系统在测试环境中进行建图，建图过程中需经过测试环境中设置的若干个障碍物，在输出的环境地图应包含对应的障碍物，如图 14 所示；

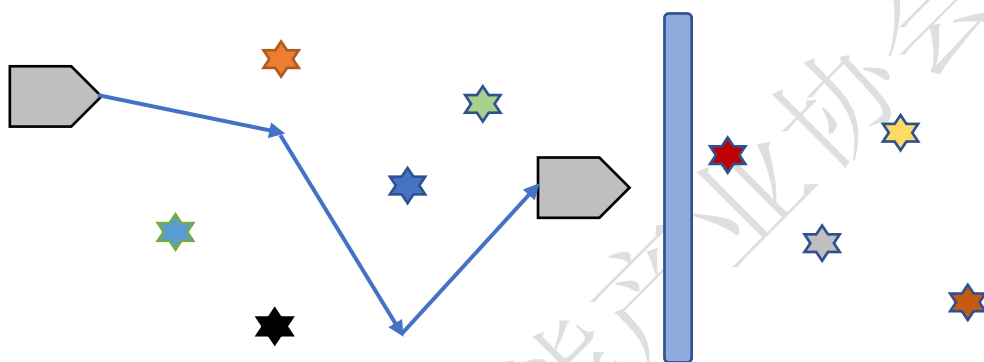


图 14 机器人对测试场景中部分场景进行建图

- b) 建图完毕后移除周围测试区域隔板；
c) 重新操作机器人系统，设置其初始地图为第一步输出的环境地图，在新的测试环境中进行建图操作，建图路线应包含移除隔板之后的新增区域，如图 15 所示；

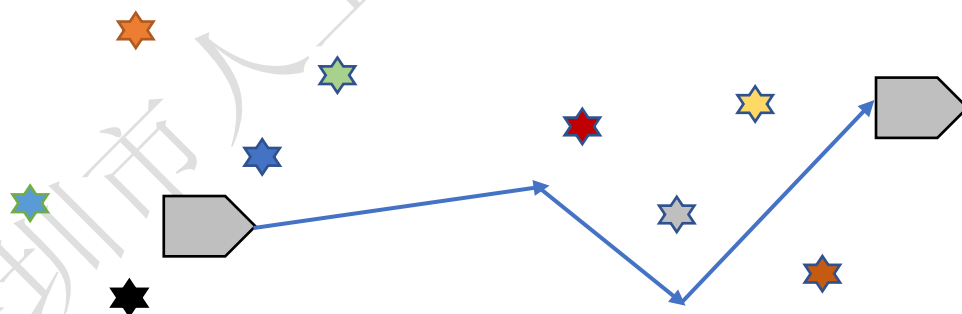


图 15 扩展建图

- d) 建图完毕后，观察初始地图与更新之后地图的变化情况，应能将地图扩展到新增区域，并正确将新增障碍物构建到地图当中。

7.3.4 评估方法

增量建图能力只考核被测机器人是否具有该项功能，不考核精度和效率。

8 多移动机器人协同能力

8.1 机器人协同避让能力

8.1.1 测试目的

考察多个机器人在狭小空间相遇后互相避让并成功到达目标位置的能力。

8.1.2 测试环境与设备

在 4.1.2 通用测试环境中,用 5.2 节中木质墙面构成狭长通道,通道宽度为 2.5 倍 W_{pass} (W_{pass} 为机器人最小通过宽度)。在通道中间 P1 点和 P2 点放置两台机器人,两点间距离为 $L_{p1p2}=5L$ (L 为机器人沿运动方向的长度),如图 8-1 所示。本试验中的墙面也可以利用真实墙面。机器人 R1 以 P1 为起始出发点, P2 为目的地,且朝向(正常前进方向) P2。机器人 R2 以 P2 为起始出发点, P1 为目的地,且朝向(正常前进方向) P1。用秒表或计时器记录机器人运行时间。

8.1.3 测试方法

测试步骤如下:

- 如图 16 所示,机器人 R1 位于 P1 点,机器人 R2 位于 P2 点;
- 进入自动导航模式,设置机器人 R1 行动至目标点位 P2,机器人 R2 行动至目标点位 P1 处,同时出发;
- 设单个机器人在无障碍物的情况下以额定速度到达目标点位的时间为 T ,若两机器人在 $6T$ 时间内均抵达目标点,且中途无碰撞现象发生,则试验成功,否则失败。
- 若协同避让成功,记录第 i 次测试中最后一个机器人到达目标点所需的时间 t_i ,并记录成功避让总次数为 n ,
- 重复试验 N 次 ($N \geq 6$)。

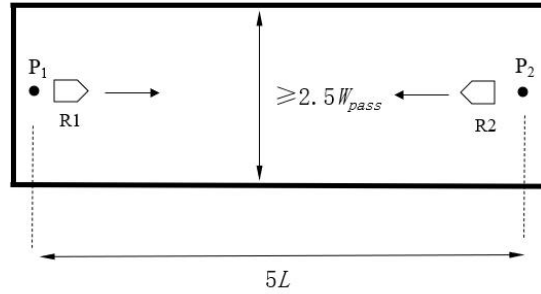


图 16 协同避让试验

8.1.4 协同避障能力和效率

设试验的总次数为 N , 机器人成功协同避障次数为 n 。记录每次试验中,最晚到达目标点机器人所用时间 t_i , 定义:

协同避障能力 P_{ca} :

$$P_{ca} = n/N \times 100\% \quad (8-1)$$

协同避让速度效率 E_{ca} :

$$E_{ca} = \frac{L_{p1p2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} / v_{\text{额定}} \times 100\% \quad (8-2)$$

其中： L_{p1p2} 为 $p1$ 和 $p2$ 之间距离；
 V 额定是机器人额定速度；
 t_i 是机器人第 i 次协同避让所用时间。

8.2 机器人协同交通能力

8.2.1 测试目的

在路径比较狭窄，只允许一台机器人通过时，考察机器人之间是否能够协同工作，自主解决简单交通问题。

8.2.2 测试环境与设备

在 4.1.2 通用测试环境中，用 5.2 节中木质墙面构成狭长通道，通道宽度为 2.5 倍 W_{pass} (W_{pass} 为机器人最小通过宽度)。在通道中部设置间距为 W ($W_{pass} \leq W \leq 1.8W_{pass}$) 的两个障碍物 SO_1 和 SO_2 。在通道中间 P_1 点和 P_2 点放置两台机器人，两点间距离为 $L_{p1p2}=5L$ (L 为机器人沿运动方向的长度)，如果 8-2 所示。本试验中的墙面也可以利用真实墙面。机器人 R_1 以 P_1 为起始出发点， P_2 为目的，且朝向（正常前进方向） P_2 。机器人 R_2 以 P_2 为起始出发点， P_1 为目的，且朝向（正常前进方向） P_1 。用秒表或计时器记录机器人运行时间。

8.2.3 测试方法

测试步骤如下：

- 如图 17 所示，机器人 R_1 位于 P_1 点，机器人 R_2 位于 P_2 点；
- 设置机器人进入自动驾驶模式，且 R_1 的目标点为 P_2 ， R_2 的目标点为 P_1 ；
- 两机器人同时出发，相向而行，基本同时达到障碍物附近；
- 设单个机器人在无障碍物的情况下以额定速度到达目标点位的时间为 T ，若两机器人在 $6T$ 时间内均顺利抵达终点，途中无碰撞现象，则试验成功，否则失败；
- 记录协同交通成功次数 n 。以及最后一个机器人到达目标点所用时间 t_i ；
- 重复试验 N ($N \geq 6$) 次。

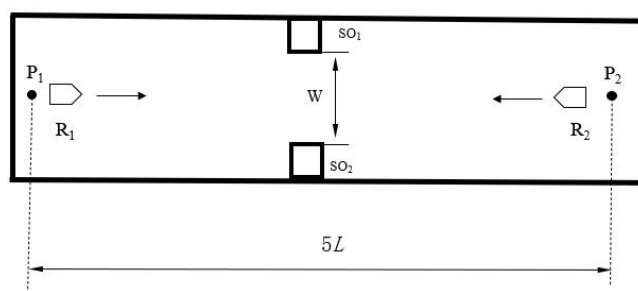


图 17 机器人协同交通试验

8.2.4 协同交通能力和效率

设试验的总次数为 N ，机器人成功协同交通次数为 n 。记录每次试验中，最晚到达目标点机器人所用时间 t_i ，定义：

协同交通能力 P_{ct} :

$$P_{ct} = n/N \times 100\% \quad (8-3)$$

协同交通速度效率 E_{ct} :

$$E_{ca} = \frac{L_{p1p2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} / v_{\text{额定}} \times 100\% \quad (8-4)$$

其中: L_{p1p2} 为 $p1$ 和 $p2$ 之间距离;

$v_{\text{额定}}$ 是机器人额定速度;

t_i 是机器人第 i 次协同避让所用时间。

9 其它特殊性能测试

9.1 室外环境光线对导航性能的影响程度测试

9.1.1 测试目的

针对室外移动机器人, 检验室外光线变化对机器人导航性能的影响。

9.1.2 测试场地与设备

使用 4.1.1 测试设备, 室外光照充足测试环境, 4.1.3 中 L 形或 U 形测试路径。

9.1.3 测试方法

选择晴天有阳光的天气, 分别在早晨 8:00–10:00 之间和傍晚 17:00–19:00 之间 (或者阳光照射地面角度为 $[10^\circ, 40^\circ]$ 和 $[140^\circ, 170^\circ]$ 之间), 按 4.3 要求, 测试机器人重定位性能指标。包括成功率 P_{rel} , 重定位时间 T_{rel} , 位置准确度 AP_l , 姿态准确度 AP_θ , 位置重复性 RP_l , 姿态重复性 RP_θ , 比较在两种不同光照环境下对机器人重定位性能的影响。

以角标 1 表示早晨测试结果, 以角标 2 表示傍晚测试结果, 定义指标如下:

$$\text{成功率比:} \quad r_P = \frac{P_{rel1}}{P_{rel2}} \quad (9-1)$$

$$\text{重定位时间比:} \quad r_T = \frac{T_{rel1}}{T_{rel2}} \quad (9-2)$$

$$\text{位置准确度比:} \quad r_{AP_l} = \frac{AP_{l1}}{AP_{l2}} \quad (9-3)$$

$$\text{姿态准确度比:} \quad r_{AP_\theta} = \frac{AP_{\theta1}}{AP_{\theta2}} \quad (9-4)$$

$$\text{位置重复性比:} \quad r_{RP_l} = \frac{RP_{l1}}{RP_{l2}} \quad (9-5)$$

$$\text{姿态重复性比:} \quad r_{RP_\theta} = \frac{RP_{\theta1}}{RP_{\theta2}} \quad (9-6)$$

9.1.4 测试结果判定

如果阳光照射角度对机器人导航性能影响不大，那么以上 6 个比率指标约等于 1。否则说明阳光照射角度对机器人导航性能有影响。影响越严重，比值会越大。测试完成后，填写两种环境下重定位测量指标值及比例，如表 6 所示：

表 6 不同光照环境下重定位性能测试对比结果

序号	环境类型	光照角度 (°)	成功率 P_{rel}	重定位时间 T_{rel} (s)	位置准确度 AP_l (mm)	姿态准确度 AP_θ (°)	位置重复性 RP_l (mm)	姿态重复性 RP_θ (°)	备注
1	早晨								
2	傍晚								
比值									

9.2 动态行人避障测试

9.2.1 测试目的

检验在人流较大的环境中机器人导航性能是否会受到影响。

9.2.2 测试环境与设备

使用 4.1.2 通用测试环境，邀请 10~20 名测试人员充当移动障碍物。

9.2.3 测试方法

根据场地面积大小，确定行人密度 $\rho \geq 0.05$ 人/m²。机器人建立好环境地图以后，进入自动驾驶模式，安排 N(N=10~20) 人在自主导航行进的机器人周围 30m 内随意走动。并安排 2~4 人在机器人周围半径 2m 范围内随意走动。充当移动障碍物的测试人员不能主动碰撞机器人，不能由后台操作机器人。测试时间为 30min，记录机器人与行人碰撞的次数 n。

9.2.4 测试结果计算

定义行人碰撞率指标如下：

$$P_{col} = \frac{n}{N} \quad (9-7)$$

9.3 防跌落测试（选择试验项目）

重要说明：

a) 本试验具有一定危险性，如果机器人在使用场景中有可能遇到类似的情况，可以考虑采用此测试项目。如果在使用场景中不存在此类情况，可以不做本项测试。另外，此项测试要求机器人必须具有相应的传感器和软件算法支持，如果没有软硬件支持，不能进行此项试验。

b) 本试验有可能损坏机器人产品，试验时必须做好防护工作！

9.3.1 测试目的

检验机器人能否探测到易跌落区域并有效避开，防止移动机器人在有凹陷的地面运行时跌落。

9.3.2 测试环境与设备

选择一个有下降楼梯或台阶的长方形平台环境（面积在 100-200m²，根据机器人大小可以适当放大和缩小测试场地的面积）。楼梯或台阶宽度 $W \geq 10L$ （L 为机器人沿运动方向的长度）。

9.3.3 测试方法

机器人建立好环境地图以后，不得设定虚拟禁区，令机器人进入自动导航模式，随机设定机器人的导航移动目标，目标点位置至少有 5 次在楼梯或台阶下边，让机器人运行 30min。

本试验有一定危险性，测试时设立警戒线，阻止无关人员靠近可能的跌落区域。并且应用绳索或挡板做好防护，避免机器人跌落或跌落后损坏设备或砸伤人员。

9.3.4 测试结果

记录 30min 内机器人跌落次数 n。

附 录 A
(资料性附录)
机器人定位导航性能参数汇总表

表 A.1 机器人定位导航性能参数汇总表

机器人定位导航性能参数汇总表								