

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007261

基于调频毫米波的安防移动机器人导航系统*

郑睿^{1,2,3}, 李方东^{1,3}

(1. 安徽师范大学物理与电子信息学院 芜湖 241002; 2. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096;
3. 安徽省智能机器人信息融合与控制工程实验室 芜湖 241002)

摘要:随着安防机器人应用领域的扩大,其工作环境的复杂性随之增加。在烟雾、灰尘和昏暗等特殊的室内环境中,视觉和激光导航方式不再适用。针对该问题,在开展毫米波雷达测距原理的研究的基础上,首先开展二脉冲对消器的研究,滤除静态杂波,并设计动态门限检测器,准确获取毫米波雷达与移动机器人之间的距离;为了提高导航精度,提出一种分割聚类法,处理距离数据集;最后基于三角定位原理设计安防机器人导航系统。实验结果表明,利用分割聚类法相比均值法,机器人的导航精度更高。在烟雾、昏暗的环境下,机器人可以沿着设定的直线和曲线运行,其导航误差约为0.11 m。

关键词:调频毫米波;安防机器人;分割聚类法;三角定位;导航

中图分类号: TH-39 TP242 TN961 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.70

Navigation system of security mobile robot based on FM millimeter wave

Zheng Rui^{1,2,3}, Li Fangdong^{1,3}

(1. College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Robot's Information Fusion and Control, Wuhu 241002, China)

Abstract: As the application field of security robots are expanded, the complexity of their working environment increases. In special environments such as smoke, dust and dark, the navigation system with visual and laser navigation manners are no longer applicable. Aiming at this problem, based on the research on the principle of the distance measurement with millimeter-wave radar, firstly, the research of two pulse canceller is carried out to filter out the static clutter. Then, a dynamic threshold detector is designed to accurately obtain the distance between the millimeter-wave radar and mobile robot. In order to improve the navigation accuracy, a segmentation clustering method is proposed to process the distance data set. Finally, a security robot navigation system based on the principle of triangulation was designed. Experiment results show that using the segmentation clustering method, the robot navigation accuracy is higher compared with that using the mean method. The robot can operate along the set straight and curvilinear lines in smoke and dark environment. The navigation error is about 0.11 m.

Keywords: FM millimeter-wave; security robot; segmentation clustering method; triangulation; navigation

0 引言

近年来,安防机器人的应用领域不断扩大^[1-2],其工作环境的复杂性也随之增加,对于安防机器人的智能化水平提出了更高的要求^[3-4]。自主导航是安防机器人的

关键技术之一,国内外开展了较多研究^[5-6],当前常用的室内导航方式为激光导航和视觉导航^[7-8]。

2015年, Huang等^[9]利用旋转激光发射器,测量机器人相对光电人工地标的扫描角度,获取空间位置信息,提出一种构建三维地图的移动机器人系统,实现机器人导航。2017年何珍等^[10]提出一种多目标、视觉与激光组

收稿日期: 2020-12-18 Received Date: 2020-12-18

* 基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085MF216)、安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-031)、安徽省重点研究与开发计划项目(202004a0502001)、安徽省高校优秀青年支持计划项目(gxyq202002)资助

合导航方法,提高了自动导引车(automated guided vehicle, AGV)的定位精度。2018年 Said 等^[11]将多个激光测距仪和视觉传感器的测量值集中在一个统一的虚拟框架中,并在虚拟框架中设计视觉伺服系统,实时准确地提取广义泰森多边形图(generalized Voronoi diagram, GVD),解决了移动机器人在未知结构化环境中的自主导航问题。

然而,安防环境是复杂多变的,尤其存在烟雾、灰尘、缺乏足够光照以至黑暗等环境,基于视觉和激光的导航方式不再适用。毫米波的波长介于厘米波与光波之间,性能稳定,兼有这两种波谱的优点,同时也有自己的独特性质。毫米波与厘米波导引头相比具有空间分辨率高的特点,与红外激光等光学导引头相比,对烟雾、灰尘穿透力更强。Bryan^[12]利用毫米波雷达,测量火山喷发的羽流和细灰云灰颗粒大小,获得火山粒度三维质量分布数据。在此之后,一些学者又利用毫米波雷达开展了一些相关研究。Bleh^[13]利用 90~100 GHz 频段的毫米波对 4 m 处的物体,构建三维(three-dimension, 3D)图像。黄旭等^[14]提出了一种基于毫米波雷达传感器的室内人员检测与追踪方法。这些研究主要利用了毫米波具有较好的空间分辨率。不仅如此, Muhammad 等^[15]在烟雾的环境下,将载有毫米波雷达的机器人和装有光学传感器的机器人,进行感知周边物体的对比实验,实验结果显示毫米波能够探测到周边环境目标,而光学类则没有。2020年,陈先中等^[16]分析毫米波和激光在煤矿井下成像特点,提出了利用毫米波的同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术,为煤矿机器人提供姿态估计和构建空间模型,从而实现自主导航的可能性。

除了利用雷达构建环境地图来实现自主导航,利用雷达对机器人定位,也是实现自主导航的主要方式。鉴于此,在分析毫米波雷达测距原理的基础上,研究杂波抑制技术;设计动态门限检测,并提出分割聚类法,精确测量雷达与机器人之间的距离;最后基于三角定位原理,设计安防机器人导航系统,实现安防机器人在烟雾、昏暗等环境中自主导航。

1 毫米波雷达的测距原理分析

为了实现基于毫米波的安防机器人(以下简称机器人)导航,其关键在于能准确测量毫米波雷达与机器人的距离。毫米波雷达(以下简称雷达)发射的连续波信号频率随时间升高或下降,发射出的信号遇到物体时,会反射回波信号。雷达通过混频器,将发射信号与回波信号进行处理,得到混频器输出信号。对混频器输出信号进行相关处理,可以获得距离信息。对发射

锯齿波信号的雷达发射信号和回波信号进行了分析如图 1 所示。

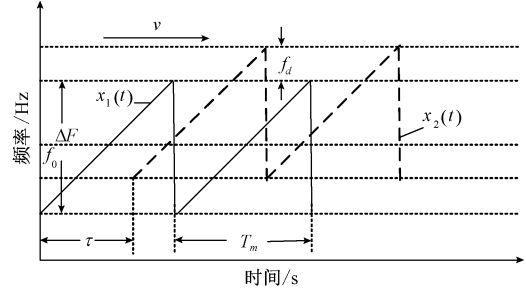


图 1 锯齿波测量运动目标原理分析

Fig. 1 Principle analysis for using sawtooth wave measuring moving target

图中 $x_1(t)$ 为发射信号,表达式^[17]为:

$$x_1(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right) + Y_0 \right] \quad (1)$$

式中: f_0 表示发射信号的中心频率; ΔF 表示调制信号带宽; T_m 表示调制周期; Y_0 表示发射信号初始相位。 $x_2(t)$ 为回波信号,表达式^[17]为:

$$x_2(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0(t - \tau) + \frac{\Delta F}{2T_m} (t - \tau)^2 \right) + Y_1 \right] \quad (2)$$

式中: Y_1 表示回波信号的初始相位; τ 表示发射信号与回波信号的延迟时间, τ 的表达式为:

$$\tau = \frac{2(d_0 + vt)}{c} \quad (3)$$

式中: v 是雷达与机器人之间的径向速度,且认为在较短的 t 时间内为是匀速; d_0 表示雷达与机器人之间的初始距离; c 表示光速。

射频组件将发射信号反向 90° , 并与雷达天线的接收信号一同输入混频器中,得混频器输出信号为 $\Delta x(t)$, 其表达式为:

$$\Delta x(t) = \sin \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right) - 2\pi \left(f_0(t - \tau) + \frac{\Delta F}{2T_m} (t - \tau)^2 \right) + Y_0 - Y_1 \right] \quad (4)$$

联立式(3)和(4),可以推导出:

$$\Delta x(t) = \sin \left[2\pi \left(\left(\frac{2d_0 \Delta F}{T_m c} + \frac{2f_0 v}{c} - \frac{4\Delta F d_0 v}{c^2} \right) t + \left(\frac{2v \Delta F}{c} - \frac{2v^2 \Delta F}{c} \right) t^2 + \left(\frac{4\pi f_0 d_0}{c} - \frac{4\pi \Delta F d_0^2}{T_m c^2} \right) + Y_0 - Y_1 \right) \right] \quad (5)$$

由于 $v \ll c$ 且处理所需的时间 t 很小,因此忽略 $1/c^2$

项和 t^2 项, 对式(5)化简得到:

$$\Delta x(t) = \sin(2\pi f_b t + Y_2) \quad (6)$$

式中: f_b 为混频器输出信号频率, 其表达式为:

$$f_b = \frac{2d_0 \Delta F}{cT_m} + \frac{2vf_0}{c} \quad (7)$$

Y_2 为混频器输出信号相位, 其表达式为:

$$Y_2 = \frac{4\pi f_0 d_0}{c} \quad (8)$$

从式(7)中可以混频器输出信号的频率中包含多普勒频移 f_d , 其表达式为:

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \quad (9)$$

联立式(7)、(9)可以推导出雷达与被测物体之间的距离 d 为:

$$d = \frac{cT_m}{2\Delta F}(f_b - f_d) \quad (10)$$

2 基于毫米波雷达的安防机器人定位方法

根据上述雷达的发射信号和回波信号的混频分析, 可以测量雷达与机器人之间的距离。在此基础上, 本节进一步研究基于雷达的机器人定位方法。

2.1 毫米波雷达混频器输出信号的处理

为了获取雷达与机器人的距离, 需要提取混频器输出信号中的频率信息, 式(6)为混频器输出单脉冲情况, 在此基础上, 对一段时间内的多脉冲信号, 离散化混频器的输出, 可得:

$$\Delta x(n) = \sin \left[\begin{aligned} &2\pi \left(\frac{2vf_0}{c} + \frac{2\Delta F(d_0 + vlT_c)}{T_m c} \right) nT_s + \\ &2\pi \cdot \frac{2(d_0 + vlT_c)}{c} f_0 \end{aligned} \right] \quad (11)$$

式中: n 为脉冲的采样点序列; 每个脉冲共 N 个采样点; T_s 为采样周期; l 为脉冲序列, 雷达连续发射 L 个脉冲; T_c 为相邻两脉冲起始时刻之间的时间差。由式(7)可知被测距离信息是包含在混频器信号的频率之中。因此首先对式(11)做快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 获取功率谱 $P(n) = |\Delta x(n)|^2$ 最大值对应的谱线位置, 即为混频器输出的信号频率值。但是该频率值 f_b 中包含速度 v 和初始距离 d_0 两个未知量, 接着再对式(11)中的 l 做 FFT 变换, 根据多脉冲的频谱峰值中, 相邻两脉冲之间的相位差求出速度。然后再将求得的速度带入式(9)和(10)即可解算雷达与机器人之间的距离。

但由于受到地面杂波等周边环境噪声的影响, 解算

出的距离值并不准确, 因此需要对杂波和噪声进行抑制, 为此设计一种二脉冲对消器, 如图2所示。

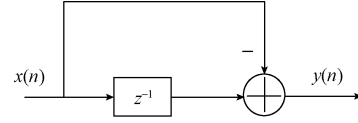


图2 二脉冲对消器

Fig. 2 Two-pulse canceller

图中, $x(n)$ 为多脉冲输入信号, $y(n)$ 为经过系统处理后的输出信号, 该系统函数为:

$$H(z) = 1 - z^{-1} \quad (12)$$

式中: $z = e^{j\omega T}$, T 为延迟时间, 其频率响应函数为:

$$|H(e^{j\omega T})| = \left| 2\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right) \right| \quad (13)$$

式中: 当 ω 为 0 时, 其频率响应函数 $|H(e^{j\omega T})|$ 为 0, 因此可以抑制输入信号的零频以及低频分量, 实现对混频器输出信号中固定背景杂波的零多普勒分量的抑制。

在实际中, 机器人所处的环境杂波和噪声通常又是变化的。在复杂变化的环境中, 为了准确地获取雷达与机器人之间的距离, 设计了一种动态门限检测器, 其基本结构如图3所示。

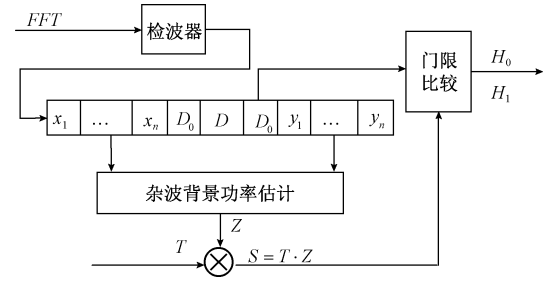


图3 动态门限处理

Fig. 3 Dynamic threshold processing

图3中 $x_i = (x_1, \dots, x_n)$ 为前沿检测单元; $y_i = (y_1, \dots, y_n)$ 为后沿检测单元; D_0 为保护单元; D 为待检测单元; Z 为待检测单元附近的采样估计背景杂波功率之和; T 为阈值因子; S 为检测门限。根据判别准则:

$$\begin{cases} D < S \Rightarrow H_1 \\ D \geq S \Rightarrow H_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: H_1 表示目标存在; H_0 表示目标不存在。图3中“杂波背景功率估计值”是结合不同杂波分布模型, 计算其功率密度函数得到。动态门限处理是根据变化的噪声环境设置变化的检测门限, 从而较为准确地输出目标信息。

2.2 分割聚类法

雷达混频器输出的多脉冲信号, 经过上述的处理, 可以准确地从中提取雷达与机器人之间的距离。但由于机

机器人的每个散射截面不同,因此在一帧多脉冲数据处理后,测量雷达与机器人之间的距离信息有很多组。根据信噪比的数学表达式为:

$$SNR = \frac{\sigma P_t G_{TX} G_{RX} \lambda^2 T_{meas}}{(4\pi)^3 d^4 K T F} \quad (15)$$

式中: σ 表示雷达散射截面; P_t 表示雷达输出功率; G_{TX} 表示发射天线增益; G_{RX} 表示接收天线增益; λ 表示信号波长; T_{meas} 表示测量时间 线性调频连续波 (Linear frequency modulated continuous wave, LFMCW) 的脉冲个数乘以每个 LFMCW 脉冲调制时间, K 表示天线噪声系数; T 表示温度; F 表示雷达内部噪声系数; d 表示雷达与目标之间的距离。由式(15)可知:处理后的信号信噪比与距离的四次方成反比,与雷达散射截面成正比。设最小信噪比门限为 SNR_{min} ,靠近雷达且散射截面大的信噪比为 SNR_m ,远离雷达且散射截面小的信噪比为 SNR_n 。由于 $SNR_m > SNR_n$,因此 SNR_m 通过 SNR_{min} 门限后获取的数据多一些。机器人在毫米波扫射范围内呈现如图 4 所示。

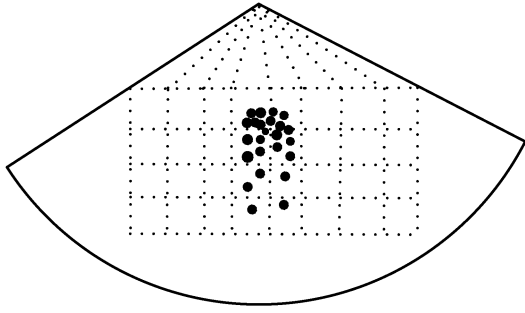


图 4 距离点集合分布情况

Fig. 4 Distribution of distance point set

图 4 中扇形区域表示雷达的探测范围。黑色的点表示:机器人表面反射回波信号的部位。不同点在扇形分布的位置表示:机器人的各个反射信号部位,距离雷达的位置。同一距离不同位置的点,依据回波信号与雷达接收天线的入射角,解算得到。所有黑色的点代表的是被雷达探测到的机器人的表面,本文将其称之为“距离点集合”。一个个黑色的点称为“距离点”。根据式(15)和图 4 可知,机器人靠近雷达的距离点多,远离雷达的距离点少。如果直接对距离点集合取均值,作为雷达与移动机器人的中心测量距离,会影响导航精度。为了进一步提高机器人的室内导航精度,对距离点集合进行如下处理,使得被测距离尽可能不受距离点集合分布不均的影响,从而让被测距离,更加接近雷达与机器人几何中心之间的距离。

雷达与机器人之间的距离点集合表示形式为:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_j\}, (j = 1, 2, 3, \dots, j) \quad (16)$$

式中: X 表示距离点集合, $x_j (j = 1, 2, 3, \dots, j)$ 表示每个距离点的值,其值大小等于机器人该部位和雷达之间的距离。假设雷达的最大张角为 α ,对雷达张角区域做分割处理,即:

$$\begin{cases} \alpha_2 - \alpha_1 = \Delta\beta \\ \alpha_3 - \alpha_2 = \Delta\beta \\ \vdots \\ \alpha_e - \alpha_{e-1} = \Delta\beta \end{cases}, e \in N^* \quad (17)$$

式(17)满足: $\alpha_e - \alpha_1 = \alpha$ 且 $(e - 1) \cdot \Delta\beta = \alpha$ 。 $\Delta\beta$ 为固定角度分割区间值; α_1 到 α_e 为每个区间的起始角度值和终止角度值; $(e - 1)$ 为对 $\Delta\beta$ 的等分割数。

将 X 中最大值元素 d_{jmax} 和最小值元素 d_{jmin} 做差值得 Δd 。令:

$$\begin{cases} d_2 - d_1 = \Delta q \\ d_3 - d_2 = \Delta q \\ \vdots \\ d_m - d_{m-1} = \Delta q \end{cases}, m \in N^* \quad (18)$$

式(18)满足: $d_m - d_1 = \Delta d$ 且 $(m - 1) \cdot \Delta q = \Delta d$ 。式中 Δq 为固定距离区间值, d_1 到 d_m 为每个区间的起始距离值和终止距离值, $(m - 1)$ 为对 Δd 的等分割数。

则雷达的扫描区域被划分为 k 个子区域,其表示式为:

$$k = (m - 1) \times (e - 1) \quad (19)$$

根据 X 的元素在 k 个子区域的分布情况,可将 X 分割为 g 份,其中 $g < k$,则 X 可表示为:

$$X = \{X_n, X_m, X_q, \dots, X_w\} \quad (20)$$

式中: X_n, X_m, X_q, X_w 表示 X 的子集合,可视作为 X 的一个聚类; n, m, q, w 下标表示每个聚类中的元素个数,对 X 的每个子集合各自求均值即: $E(X_n), E(X_m), E(X_q), \dots, E(X_w)$, 将 X 的所有子集合的均值再求均值,可得 X 的均值为:

$$d_{means} = \frac{1}{g} [E(X_n) + E(X_m) + E(X_q) + \dots + E(X_w)] \quad (21)$$

根据式(21)可知, d_{means} 为雷达与机器人几何中心之间的近似距离。

2.3 三角定位

由此可以开展在室内布局三个雷达,实现基于三角定位的导航研究。在室内建立导航坐标系如图 5 所示。

由图 5 可知,3 个雷达分别放置于导航坐标系的 A 、 B 、 C 3 点,坐标分别为: (x_A, y_A, z_A) , (x_B, y_B, z_B) , (x_C, y_C, z_C) 。 $D(x_D, y_D, z_D)$ 为机器人待测坐标。对距离点集合采用分割聚类法,解算出 A 、 B 、 C 3 点到机器人几何中心的近似距离分别是 $d_{A-means}$ 、 $d_{B-means}$ 、 $d_{C-means}$ 。已知 $A(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 、 $C(x_C, y_C, z_C)$ 3 点的坐标和

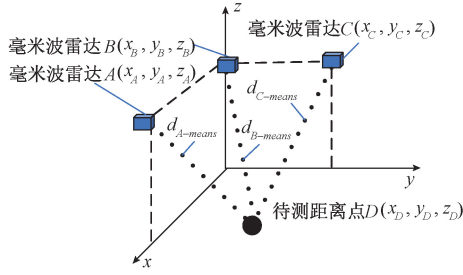


图5 三角定位原理

Fig. 5 Principle of triangulation

$d_{A\text{-means}}$ 、 $d_{B\text{-means}}$ 、 $d_{C\text{-means}}$ 的距离,可求出 D 点的坐标 (x_D, y_D, z_D) 。根据“三坐标测量”的基本原理,联立方程组:

$$\begin{cases} (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 + (z_D - z_A)^2 = d_{A\text{-means}}^2 \\ (x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 + (z_D - z_B)^2 = d_{B\text{-means}}^2 \\ (x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 + (z_D - z_C)^2 = d_{C\text{-means}}^2 \end{cases} \quad (22)$$

由于不考虑机器人在空间的高度位置,即 $z_A = z_B = z_C = z_D$ 。对式(22)化简为:

$$\begin{cases} (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 = d_{A\text{-means}}^2 & ① \\ (x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 = d_{B\text{-means}}^2 & ② \\ (x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2 = d_{C\text{-means}}^2 & ③ \end{cases} \quad (23)$$

用①减去②和③可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} [(x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2) - (d_{A\text{-means}}^2 - d_{B\text{-means}}^2)] = \\ x_D(x_A - x_B) + y_D(y_A - y_B) \\ \frac{1}{2} [(x_A^2 - x_C^2 + y_A^2 - y_C^2) - (d_{A\text{-means}}^2 - d_{C\text{-means}}^2)] = \\ x_D(x_A - x_C) + y_D(y_A - y_C) \end{cases} \quad (24)$$

令

$$D = \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_A - x_B & y_A - y_B \\ x_A - x_C & y_A - y_C \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} [(x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2) - (d_{A\text{-means}}^2 - d_{B\text{-means}}^2)] \\ \frac{1}{2} [(x_A^2 - x_C^2 + y_A^2 - y_C^2) - (d_{A\text{-means}}^2 - d_{C\text{-means}}^2)] \end{bmatrix} \quad (27)$$

则待测点 D 的坐标为:

$$D = A^{-1}b \quad (28)$$

由此可以解算出机器人在导航坐标系的位置。

3 实验与分析

3.1 实验方案

基于毫米波的机器人导航方案如图6所示。在室内5 m×5 m地毯构建导航坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$, 原点设置在矩形地毯内,如图6的 O 点。 x 轴指向地理北方向, y 轴垂直于 x 轴指向东, z 轴垂直于 x 与 y 轴所在的水平面指向天。3支三角支架上分别固定3个雷达,3个雷达位置分别是 $A(-0.5, 2, 1.1)$ 、 $B(1.5, -0.5, 1.1)$ 、 $C(2, 4.5, 1.1)$ 。云端服务器(以下简称服务器)选用E5-572G-57MX 宏碁电脑。雷达与服务器通信连接使用带有信号放大器的USB3.0 差分信号线。服务器与机器人之间通信连接使用两个 ATK-ESP8266 无线传输模块。服务器与 ATK-ESP8266 模块之间的连接,使用 USB 转 TTL 串口模块。机器人的底层控制模块选用搭载 STM32F103RCT6 芯片的开发板,芯片内部运行 Free-RTOS 操作系统,可编程并设置导航路径和终点坐标。

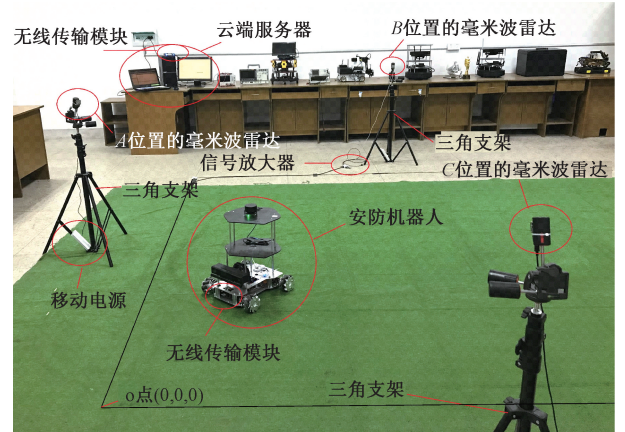


图6 实验方案实物图

Fig. 6 Photo of the experiment scheme

在上述方案中,选用 TI 公司的毫米波雷达,型号为 IWR1642,频段为 77 GHz~81 GHz。如图7所示。

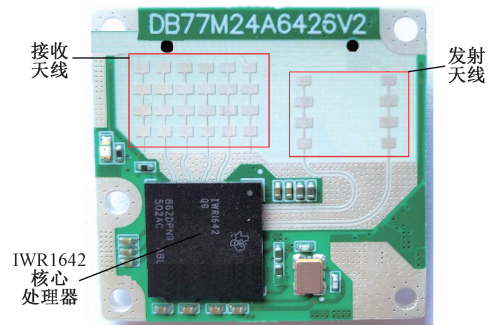


图7 IWR1642 毫米波雷达

Fig. 7 IWR1642 millimeter wave radar

上述实验方案的信息传递与处理过程如图8所示。

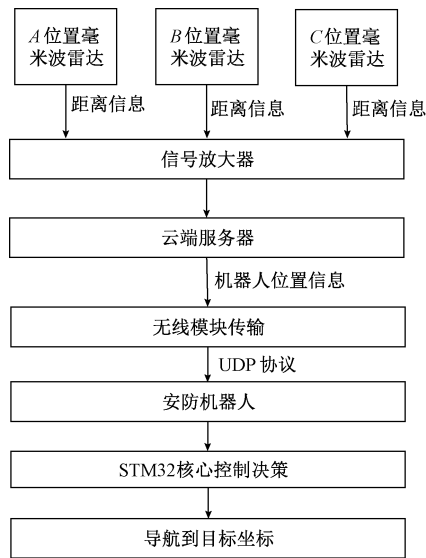


图8 信息传递与处理

Fig. 8 Information transmission and processing

由图8可知,系统中信号传递与处理过程为:3个雷达系统输出的距离信息经过放大器传输至服务器,服务器根据相应算法解算出机器人的位置信息,并通过无线模块输出至机器人的控制端。根据目标位置,解算机器人的逆运动学方程,获取机器人的运动参数,并采用PID算法的位置闭环控制,使得机器人向目标点运行。

3.2 实验参数

1) 毫米波雷达参数设置

仰角倾斜: 12° 。

雷达的最大视场角为:水平角范围: $\pm 60^\circ$ 、俯仰角范围: $\pm 19^\circ$ 。

最小信噪比门限 SNR_{min} 参数设置:50。

雷达串口通讯波特率:921 600。

接收天线增益设置为:48。

2) 安防机器人参数

机器人的长、宽、高分别约为:42、40、50 cm。质量约为6.2 kg,最大速度1.2 m/s,最大负载能力15 kg。

机器人的运动车轮选用无死角、可全方位移动式麦克纳姆轮,轮毂直径约10 cm,重量约为1.52 kg。

控制电机选用35 W功率MD36 N行星减速电机。

底层主控核心为STM32F103RCT6芯片。

3) 电源参数

雷达的供电装置是5 V,2 A直流电源适配器。

信号放大器的供电装置是5 V,1 A移动电源供电。

连接云端服务器的ATK-ESP8266模块使用5 V,1 A的USB接口供电。

连接机器人的ATK-ESP8266模块采用3.3 V,0.3 mA板载供电。

移动机器人供电装置是25.2 V,5 A锂电池。

4) 云端服务器与移动机器人之间通讯

无线模块通讯波特率:921 600

无线模块通讯协议:UDP协议

连接云端服务器的ATK-ESP8266模块配置为“AP(热点)模式”,并与RS232模块级联,设置热点名称为:“ATK-ESP8266”,认证密码为:“12345678”,加密方式为:WPA_WPA2_PSK。IP地址为:192.168.4.1。

连接机器人上的ESP8266无线模块配置为“STA(终端)模式”。IP地址为:192.168.4.2。

5) 环境

利用22块烟饼制造烟雾(一块烟饼直径约7 cm,厚度约1 cm,重量约为60 g,主要成分为氯化铵、面粉、松香),并且室内光线不足,如图9所示。



图9 烟雾和昏暗的实验环境

Fig. 9 Smoke and dark environment

3.3 实验结果与分析

根据机器人实际运动情况,分别设置直线和曲线两种运动路径的导航方式,并对其实验结果展开分析。

1) 直线运动轨迹的实验结果分析

首先设置机器人的路径为直线走,其表达式为: $y = x$ 。起点设置为(0.5,0.5,0),终点设置为(4,4,0)。根据实验参数,开展实验研究,获得机器人的实际运行轨迹与理论轨迹如图10所示。

图10中实线为机器人理论运行轨迹;虚线表示对距离点集合做均值处理后的实际运动轨迹;点线为采用分割聚类法处理后的实际运动轨迹。由图10可知,对每一帧的距离点集合,使用分割聚类法得到的运动轨迹,比均值处理法更接近理论运动轨迹。

再开展多次机器人直线运行的导航实验,将终点位置设置为(3.5,3.5,0),并随机选择50组实验数据,可得机器人的终点位置如图11所示。

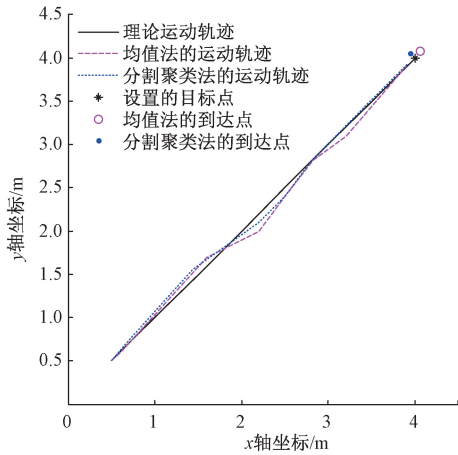


图10 机器人直线运行轨迹

Fig. 10 Trajectory of robot in straight operation

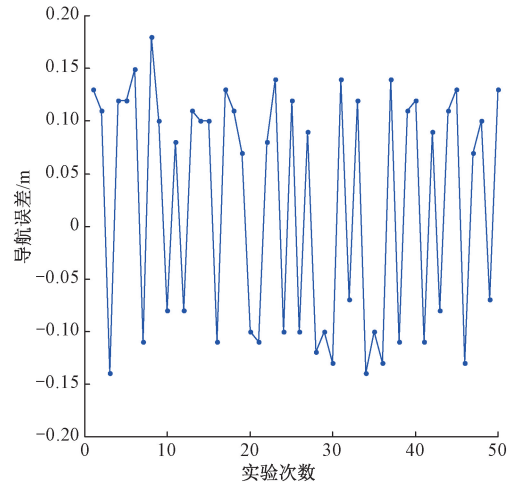


图12 导航误差(直线路径)

Fig. 12 Navigation error (straight path)

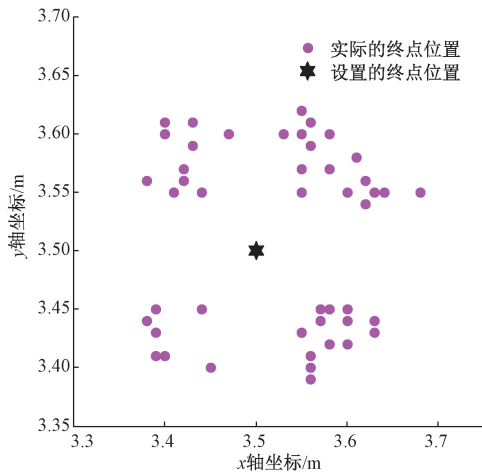


图11 机器人的终点位置(直线路径)

Fig. 11 End position of the robot (straight path)

由图11可知,实际的终点位置分布在设置的终点位置的四周,该组数据符合高斯分布,且靠近设置的终点坐标。为了进一步分析实际的终点位置和设定坐标之间的定量关系,对实际终点位置的误差作图分析。若实际终点到原点的距离大于目标点到原点的距离,导航误差取正,反之取负,可得机器人直线运行时的导航误差如图12所示。

由图12误差分析图可知:实际终点位置的最大标准偏差为0.178 m,最小标准偏差为0.070 m。根据标准偏差可推导出直线运行时,机器人的导航误差约为0.110 m。

2) 曲线运动轨迹的实验结果分析

再设置机器人运行轨迹为曲线走,其表达式为:

$$y = \frac{5}{6}x^2 - \frac{29}{6}x + 8。起始点为(1, 4)点,目标点为$$

(4, 2)点,根据实验参数,开展实验研究,获得机器人的实际运行轨迹与理论轨迹如图13所示。

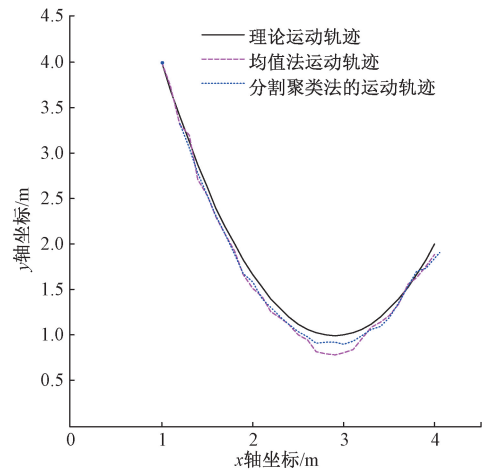


图13 机器人曲线运行轨迹

Fig. 13 Trajectory of robot in curvilinear operation

图13中实线为机器人理论运行轨迹;虚线为对距离点集合,做均值处理后的实际运动轨迹;点线为采用分割聚类法处理后的实际运动轨迹。对比图13的三者运动轨迹可知,使用分割聚类法得到的运动轨迹,比均值处理法更接近理论运动轨迹。

同理,继续开展多次机器人曲线运行的导航实验,并随机选择50组实验数据,可得机器人的终点位置如图14所示。

由图14可知,实际的终点位置分布在设置的终点位置的四周,且该组数据分布情况如同上组数据一样,符合高斯分布。为了进一步分析曲线运行的机器人导航精度,及其实际的终点位置和设定位置坐标之间的定量关系,对实际终点位置的误差作图分析。若实际终点到原

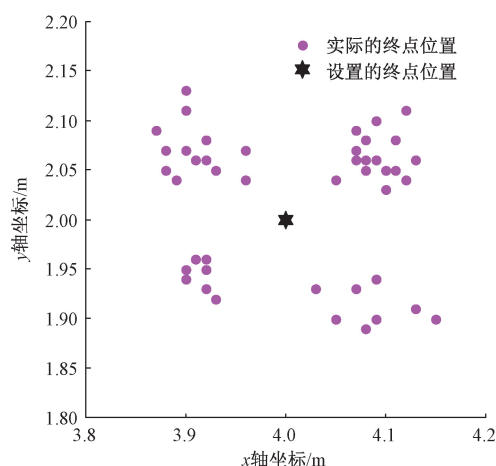


图 14 机器人的终点位置(曲线路径)

Fig. 14 End position of the robot (curvilinear path)

点的距离大于目标点到原点的距离,导航误差取正,反之取负,可得机器人曲线运行时的导航误差如图 15 所示。

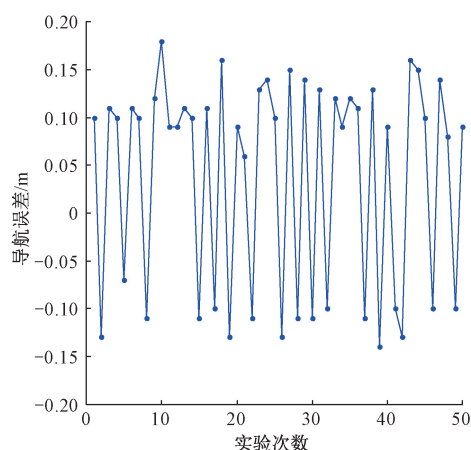


图 15 导航误差(曲线路径)

Fig. 15 Navigation error (curvilinear path)

由图 15 误差分析图可知:实际终点位置的最大标准偏差为 0.180 m,最小标准偏差为 0.064 m。根据标准偏差可推导出曲线运行时,机器人的导航误差约为 0.113 m。

根据机器人直线与曲线运行方式的分析,可得其导航误差约为 0.11 m。

4 结 论

针对烟雾、昏暗等特殊环境中的安防机器人自主导航问题,提出基于调频毫米波的导航方法。根据测量雷达与机器人之间的距离,采用三角定位法求解机器人的位置。针对雷达输出的多个距离数据集合,提出分割聚类法,提高了雷达与机器人之间距离的测量精度。对

提出的方法进行了实验验证,机器人可以沿着设定的直线和曲线运行,导航精度相对均值法更高。根据设定的坐标系,机器人的导航误差约为 0.11 m,可实现机器人的自主导航。

本文提出的毫米波导航方案,具有穿透能力强、分辨率高等特点,完成了在烟雾、昏暗等环境中机器人的导航实验,而激光和视觉导航方式是不能适用于此类环境的。因此本文提出的方法拓宽了安防机器人的应用领域。

参考文献

- [1] THEODORIDIS T, HU H. Toward intelligent security robots: A survey[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews), 2012, 42(6): 1219-1230.
- [2] QIAO G, SONG G, WANG Y, et al. Autonomous network repairing of a home security system using modular self-reconfigurable robots [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013, 59(3): 562-570.
- [3] ARSLAN O, GURALNIK D P, KODITSCHKE D E. Coordinated robot navigation via hierarchical clustering[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(2): 352-371.
- [4] CHE Y, OKAMURA A M, SADIGH D. Efficient and trustworthy social navigation via explicit and implicit robot-human communication[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(3): 692-707.
- [5] FAISAL M, ALGABRI M, ABDELKADER B M, et al. Human expertise in mobile robot navigation[J]. IEEE Access, 2018(6): 1694-1705.
- [6] 孙曼晖, 杨绍武, 易晓东, 等. 基于 GIS 和 SLAM 的机器人大范围环境自主导航[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 586-592.
- [7] SUN M H, YANG SH W, YI X D, et al. Autonomous navigation of robot in large-scale environments based on GIS and SLAM [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2017, 38 (3): 586-592.
- [7] 樊绍胜, 杨迪, 邹德华, 等. 输电线路螺栓紧固带电作业机器人的视觉搜索、识别与定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1514-1523.
- [7] FAN SH SH, YANG D, ZOU D H, et al. Vision-based tracing, recognition and positioning strategy for bolt tightening live working robot on power transmission line[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1514-1523.
- [8] CHEN Y, LEIGHTON B, ZHU H, et al. Submap-based indoor navigation system for the fetch robot[J]. IEEE Access, 2020, 8: 81479-81491.
- [9] HUANG Z, ZHU J, YANG L, et al. Accurate 3-D

- position and orientation method for indoor mobile robot navigation based on photoelectric scanning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(9): 2518-2529.
- [10] 何珍, 楼佩煌, 钱晓明, 等. 多目视觉与激光组合导航 AGV 精确定位技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2830-2838.
- HE ZH, LOU P H, QIAN X M, et al. Research on precise positioning technology for AGV based on multi-object vision and laser integrated navigation [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2017, 38(11): 2830-2838.
- [11] SAID H B, MARIE R, STEPHANT J, et al. Skeleton-Based visual servoing in unknown environments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(6): 2750-2761.
- [12] BRYAN S, CIARKE A, VANDERKLUYSEN L, et al. Measuring water vapor and ash in volcanic eruptions with a millimeter-wave radar/Imager [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(6): 3177-3185.
- [13] BLEH D. W-Band time-domain multiplexing FMCW MIMO radar for far-field 3-D imaging [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(9): 3474-3484.
- [14] 黄旭, 牛洁. cTracker: 一种基于毫米波雷达传感器的室内人员快速检测与追踪系统 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 130-139.
- HUANG X, NIU J. cTracker: A fast-indoor people detection and tracking system based on mmWave radar sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2020, 41(9): 130-139.
- [15] MUHAMMAD S, NARDI D, OHNO K, et al. Environmental sensing using millimeter wave sensor for extreme conditions [C]. IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2015:1-7.
- [16] 陈先中, 刘荣杰, 张森, 等. 煤矿地下毫米波雷达点云成像与环境地图导航研究进展 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2182-2192.
- CHEN X ZH, LIU R J, ZHANG S, et al. Development of millimeter wave radar imaging and SLAM in underground coal mine environment [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2182-2192.
- [17] 朱文涛, 郑纪彬, 苏涛, 等. 锯齿波线性调频连续波信号的检测与参数估计 [J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(2): 110-116.
- ZHU W T, ZHENG J B, SU T, et al. Detection and parameter estimation of sawtooth linear frequency modulated continuous wave signal [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(2): 110-116.

作者简介



郑睿 (通信作者), 2002 年于安徽工业大学获得学士学位, 2005 年于安徽工业大学获得硕士学位, 2013 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为安徽师范大学教授, 主要研究方向为机器人控制技术。

E-mail: zrxw0609@ahnu.edu.cn

Zheng Rui (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2002 and M. Sc. degree in 2005 both from Anhui University of Technology, received his Ph. D. degree in 2013 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Now, he is a professor in Anhui Normal University. His main research interest includes robot control technology.



李方东, 2018 年于安徽师范大学皖江学院获得学士学位, 现为安徽师范大学研究生, 主要研究方向为移动机器人导航与定位。

E-mail: Fangdong_Li2021@163.com

Li Fangdong received his B. Sc. degree in 2018 from Wanjiang College of Anhui Normal University. Now, he is a master student in Anhui Normal University. His main research interest includes navigation and positioning of mobile robot.